



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SAARA POHJALAINEN  
SUOMEN KANTAVETKKOYHTIÖN EPÄSUORIEN KASVIHUONE-  
KAASUPÄÄSTÖJEN TUNNISTAMINEN JA SUURUUDEN MÄÄRIT-  
TÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: yliopistonlehtori Henrik Tolvanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
8. elokuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**SAARA POHJALAINEN:** Suomen kantaverkkoyhtiön epäsuorien kasvihuonekaasupäästöjen tunnistaminen ja suuruuden määrittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 67 sivua, 4 liitesivua

Marraskuu 2018

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Ympäristötekniikka

Tarkastaja: yliopistonlehtori Henrik Tolvanen

**Avainsanat:** epäsuorat päästöt, hiilijalanjälki, kasvihuonekaasu, sähkönsiirto

Ilmastonmuutos on merkittävä kansainvälinen uhkatekijä. Selkein ilmastonmuutoksen vaikutus on globaali keskilämpötilojen nousu. Antropogeenisiä kasvihuonekaasupäästöjä pidetään pääasiallisena syynä ilmastonmuutokselle. Koska energiantuotantosektori on vastuussa valtaosasta ihmisen toiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä, muutokset kansainvälisessä energiajärjestelmässä ovat välttämättömiä lämpötilojen kiihtyvän kohoamisen hillitsemiseksi.

Energiantuotannosta aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi uusiutuvien energiantuotantomuotojen hyödyntämistä täytyy lisätä. Tämä luo haasteita myös sähkönsiirtoverkolle. Hajautunut energiantuotanto vaatii verkolta lisäkapasiteettia, mikä edellyttää mittavia ja hiili-intensiivisiä investointeja sähkönsiirtojärjestelmään. Tämän diplomityön tavoitteena oli arvioida Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n hiilijalanjälkeä keskittyen yhtiön epäsuorien päästöjen määrittämiseen. Tämän lisäksi kartoitettiin yhtiön päästövähennysmahdollisuuksia.

Hiilijalanjälkianalyysi toteutettiin GHG Protocolin kasvihuonekaasujen määrän arviointiin tarkoitetun ohjeistuksen mukaisesti. Tutkimuksen metodologia sisälsi päästölähteestä riippuen sekä prosessi- että panos-tuotospohjaista elinkaarianalyysia. Laskentamenetelmien yhdistäminen mahdollisti edustavamman hiilijalanjälkiarvion tekemisen.

Saatujen tulosten perusteella Fingridin epäsuorat päästöt olivat yhteensä 268 604 t CO<sub>2</sub>-ekv tarkasteluvuonna 2017. Siirrettyä energiayksikköä kohden määrä oli 3,92 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Tulokset olivat 19,6 % yhtiön vuoden 2017 vuosikertomuksessa arvioituja epäsuoria päästöjä suuremmat. Siirtohäviöt vastasivat noin 83 %:a kaikista lasketuista epäsuorista päästöistä. Toiseksi merkittävin päästölähde oli verkon materiaalien ja komponenttien valmistus. Erityisesti teräksen ja alumiinin tuotanto vaikutti valmistusvaiheen hiilijalanjälkeen.

Yhtiön suurimmat päästövähennysmahdollisuudet ovat häviöiden pienentämisessä. Häviötasoon vaikuttaminen edellyttää kuitenkin verkon energiatehokkuuden lisäämistä uusien komponenttien ja vanhojen siirtolinjojen korjausrakentamisen muodossa. Fingridin keskeisiksi päästövähennystoimiksi häviöihin vaikuttamisen ohelle ehdotettiin kierrätysmateriaalien suosimista ja ympäristönäkökohtien aiempaa perusteellisempaa huomiointia yhtiön hankintamenettelyissä.

## ABSTRACT

**SAARA POHJALAINEN:** Identification and Determination of Indirect Greenhouse Gas Emissions from the Finnish Transmission System Operator

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 67 pages, 4 Appendix pages

November 2018

Master's Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

Major: Environmental Engineering

Examiner: University Lecturer Henrik Tolvanen

**Keywords:** indirect emissions, carbon footprint, greenhouse gas, electricity transmission

Climate change is a considerable threat faced by the global community. The most obvious result of the changing climate is the increase in average temperatures of the Earth's climate system. The anthropogenic emission of greenhouse gases (GHGs) is considered to be the primary cause of climate change. Since the power industry accounts for the largest share of anthropogenic release of GHGs, the reorganization of global energy system plays a significant role in the efforts to control the rapid temperature rise.

In order to reduce power production related emissions, the exploitation of renewable energy sources must be increased. This also makes demands to the power transmission system. Decentralizing the generation of energy requires additional capacity of the transmission grid, which calls for substantial and carbon intensive investments on the transmission system. The goal of this thesis was to assess the carbon footprint of the Finnish transmission system operator Fingrid Oyj, particularly focusing on the indirect GHG emissions of the company. In addition, some opportunities for emission reduction were surveyed.

The carbon footprint analysis was made by following specific GHG accounting standards by The Greenhouse Gas Protocol. The methodology of the study included both process and input-output based life cycle analysis, depending on the emission source in question. Combining these methods provided a more representative assessment of the company's carbon footprint.

According to the results, Fingrid's total indirect emissions were 268 604 t CO<sub>2</sub>-e in the base-year 2017. The climate change impacts were of 3.92 g CO<sub>2</sub>-e for each kWh of electricity transmitted. The results were 19.6 % higher compared with the estimated indirect GHG emissions in the annual report 2017 of the company. Transmission losses accounted for about 83 % of all calculated indirect emissions. The second largest emission sources were materials of the network infrastructure and manufacturing of the components. Steel and aluminum production was particularly influential in the carbon footprint of the manufacturing stage.

The main opportunities to reduce the emissions of the company are related to transmission losses. However, affecting the loss level demands increase in the energy efficiency of the grid by new components or reconstruction of old transmission lines. In addition to reduction of losses, favoring secondary materials and more careful consideration of environmental aspects at the procurement stage were recommended.

## ALKUSANAT

Opintoni Tampereen teknillisessä yliopistossa tulevat päätökseen näiden sanojen myötä. Olo on äärimmäisen haikea, ja muistelen edeltäneitä kuutta vuotta lämmöllä. Tutkintoni huipentui tähän diplomityöhön, jossa tutkin Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n epäsuoria kasvihuonekaasupäästöjä ja niihin liittyviä päästövähennysmahdollisuuksia. Työn tekoprosessi on ollut vaiherikas ja opettavainen, mikä kuvaa osuvasti myös aikaani korkeakoulumaailmassa.

Haluan kiittää Fingridiä mielenkiintoisen opinnäytetyöpaikan tarjoamisesta sekä mukavasta työyhteisöstä, jonka ansiosta Käpylään oli ilo tulla myös maanantaiaamuisin. Työssä saamani tuki on ollut ensiluokkaista, josta on kiittäminen ennen kaikkea ohjaajiani Jenni-Julia Saikkosta, Satu Vuorikoskea, Tiina Seppästä ja Maija Nurmea. Diplomityön ohjaajana ja tarkastajana toimi yliopiston puolesta Henrik Tolvanen, jonka asiantuntevien ohjeiden avulla urakkaa on ollut helppo viedä eteenpäin. Varsinaisten ohjaajieni lisäksi haluan antaa erityiskiitokset perheelleni ja ystävilleni. Oikoluvussa avustaneet äitini ja muut läheiseni ovat jättäneet konkreettisen jälkensä työhön.

Työni teema on poikkeuksellisen ajankohtainen 2010-luvun yhteiskunnassa, jossa valintojemme merkitys eliökunnan tulevaisuuteen on suuri. Tämä diplomityö oli ensimmäinen, muttei viimeinen konkreettinen vaikutusyritykseni tämän tulevaisuuden muotoutumiseen.

Helsingissä, 20.11.2018

Saara Pohjalainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	SUOMEN KANTAVERKKO .....	3
2.1	Siirtoverkon komponentit.....	4
2.2	Siirtoverkon ympäristövaikutukset .....	6
3.	HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA .....	8
3.1	Lämmityspotentiaali GWP .....	8
3.2	Laskentamenetelmät.....	9
3.2.1	Prosessi-LCA .....	10
3.2.2	IO-LCA .....	11
3.2.3	Hybridi-LCA .....	11
3.3	Standardit .....	12
3.3.1	GHG Protocolin raportointiohjeet.....	12
3.3.2	ISO 14064-1 .....	14
3.4	Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt .....	15
4.	KANTAVERKKOYHTIÖN HIILIJALANJÄLKI.....	18
4.1	Suorat eli ensimmäisen laskentatason päästöt.....	19
4.2	Epäsuorat eli toisen laskentatason päästöt .....	20
4.3	Muut epäsuorat eli kolmannen laskentatason päästöt .....	20
5.	TUTKIMUSMETODIT JA PÄÄSTÖLASKENNAN LÄHTÖTIEDOT.....	23
5.1	Omakäyttösähkö.....	25
5.2	Omakäyttölämpö .....	26
5.3	Siirtohäviöt.....	26
5.4	Voimajohtojen materiaalit ja komponentit.....	26
5.5	Sähköasemien materiaalit ja komponentit.....	29
5.6	Varavoimalaitosten materiaalit ja komponentit .....	32
5.7	Rakentaminen ja muut palvelut.....	32
5.8	Polttoaineet.....	35
5.9	Komponenttien kuljetukset .....	35
5.10	Jätehuolto .....	37
5.11	Liikematkustaminen .....	38
5.12	Työmatkat.....	39
6.	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	40
6.1	Toisen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt.....	40
6.2	Kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt.....	41
6.2.1	Voimajohtojen materiaalit ja komponentit .....	42
6.2.2	Sähköasemien materiaalit ja komponentit .....	43
6.2.3	Varavoimalaitosten materiaalit ja komponentit .....	43
6.2.4	Merkitykseltään pienemmät päästökategoriat.....	44
6.3	Vertailu aiempaan tutkimukseen .....	45
6.3.1	Kantaverkkoyhtiöiden hiilijalanjälkianalyysit .....	46

6.3.2	Tutkimuskirjallisuus.....	47
6.4	Päästövähennysmahdollisuudet.....	49
6.5	Tulosten luotettavuus ja mahdolliset virhelähteet.....	50
6.5.1	Yleistykset.....	51
6.5.2	Materiaalivalinnat .....	51
6.5.3	Laskentamenetelmät.....	52
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	54
	LÄHTEET.....	56

LIITE A: PÄÄSTÖKERTOIMET

LIITE B: CPI-KULUTTAJAHINTAINDEKSI

LIITE C: KULJETUKSET

LIITE D: PÄÄSTÖLASKENNAN TULOKSET

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Suomen voimajärjestelmä (mukaillen Fingrid 2018f).</i> .....	3
<b>Kuva 2.</b>	<i>Harustettu (vas.) ja vapaasti seisova pylväs (Jalonen 2011).</i> .....	5
<b>Kuva 3.</b>	<i>Maisema- ja peltopylväs (oik.) (Fingrid 2018c; Fingrid 2018e).</i> .....	5
<b>Kuva 4.</b>	<i>Kytäkinkenttiä Karjaan sähköasemalla (Fingrid 2018f).</i> .....	6
<b>Kuva 5.</b>	<i>Hiilijalanjäljen laskentamenetelmät sovelluskohteittain (mukaillen Peters 2010).</i> .....	10
<b>Kuva 6.</b>	<i>Kasvihuonekaasupäästöjen GHG Protocolin mukaiset laskentatasot (GHG Protocol 2011, s. 5).</i> .....	13
<b>Kuva 7.</b>	<i>Kantaverkkoyhtiön hiilijalanjälki.</i> .....	19
<b>Kuva 8.</b>	<i>Kantaverkon elinkaari.</i> .....	20
<b>Kuva 9.</b>	<i>Tutkimuksen raja.</i> .....	23
<b>Kuva 10.</b>	<i>Päästölaskennan vaiheet (mukaillen ISO 14064-1 2012, s. 8).</i> .....	25
<b>Kuva 11.</b>	<i>Tuotetun jätteen käsittelytavat (L&amp;T 2018).</i> .....	37
<b>Kuva 12.</b>	<i>Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).</i> .....	40
<b>Kuva 13.</b>	<i>Kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).</i> .....	41
<b>Kuva 14.</b>	<i>Voimajohtojen kasvihuonekaasupäästöt komponentteittain vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).</i> .....	42
<b>Kuva 15.</b>	<i>Sähköasemien kasvihuonekaasupäästöt komponentteittain vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).</i> .....	43
<b>Kuva 16.</b>	<i>Varavoimalaitosten kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).</i> .....	44
<b>Kuva 17.</b>	<i>Fingridin siirtohäviöiden ja liikematkustamisen päästöjen kehitys vuosina 2014–2017 (Fingrid 2015; Fingrid 2016; Fingrid 2017; Fingrid 2018j).</i> .....	47
<b>Kuva 18.</b>	<i>Materiaalivalintojen vaikutus komponenttien hiilijalanjälkeen.</i> .....	52
<b>Kuva 19.</b>	<i>Hiilijalanjälkilaskennan tulokset pylväsdiagrammina.</i> .....	71

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AAAC	engl. all aluminium alloy conductor, alumiiniseosjohdin
AAC	engl. all aluminium conductor, alumiinijohdin
AACSR	engl. aluminium alloy conductor, steel reinforced, teräsvahvisteinen alumiiniseosjohdin
ACSR	engl. aluminium conductor, steel reinforced, teräsvahvisteinen alumiinijohdin
CO <sub>2</sub> -ekv	hiilidioksidiekvivalentti
CVC3	Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard
GIS	engl. gas insulated switchgear, kaasueristeinen kojeisto
GWP	engl. global warming potential, lämmityspotentiaali
hkm	henkilökilometri, henkilön kuljetussuoritteen yksikkö
IO-LCA	engl. input-output lifecycle analysis, panos-tuotoselinkaarianalyysi
IPCC	the Intergovernmental Panel on Climate Change, valtioidenvälinen ilmastomuutospaneeli
ISO	the International Organization of Standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
LCA	engl. lifecycle analysis, elinkaarianalyysi
OPGW	engl. optical ground wire, ukkosköysivalokuitu
PVC	polyvinyylikloridi
TEU	engl. twenty foot equivalent unit, kontti
tkm	tonnikilometri, kuljetuskyvyn yksikkö
WTT	engl. well-to-tank, polttoaineketjun alkupää (tuotanto)



# 1. JOHDANTO

Edeltäneet kolme vuosikymmentä ovat olleet lämpimimmät viimeiseen 1 400 vuoteen pohjoisen pallonpuoliskon ilmastohistoriassa. Ilmakehän alaosien lisäksi valtameren keskilämpötila on ollut selvässä nousussa, jonka odotetaan kiihtyvän entisestään tämän vuosisadan aikana. (IPCC 2014, s. 2, 8) Tiedeyhteisö on lähes yksimielinen ihmisen toiminnan selkeästä roolista ilmastomuutoksen etenemisessä sekä kohoavien lämpötilojen negatiivisesta vaikutuksesta koko ekosysteemin toimintaan. Nämä vaikutukset ovat kokonaisvaltaisia sekä peruuttamattomia, joten huoli niiden hallitsemisesta on noussut keskeiseen rooliin kansainvälisessä keskustelussa. (Awanthi 2018)

Ilmastomuutos aiheutuu kasvihuonekaasujen kasvaneista pitoisuuksista maan ilmakehässä. Kasvihuonekaasut ovat kaasumaisia yhdisteitä, jotka absorboivat maan pinnalta heijastuvaa lämpösäteilyä aiheuttaen alailmakehää lämmittävän kasvihuoneilmiön. (IPCC 2007, s. 115–116) Itsessään kasvihuoneilmiö on reunaehto elämälle maapallolla, mutta sen voimistuminen ihmisen toiminnan seurauksena johtaa ilmaston poikkeuksellisen nopeaan lämpenemiseen (Awanthi 2018). Tärkeimpiin kasvihuonekaasuihin lukeutuvat vesihöyryn ( $H_2O$ ) ohella hiilidioksidi ( $CO_2$ ), metaani ( $CH_4$ ) ja dityppioksidi ( $N_2O$ ), joita syntyy sekä luonnon omissa prosesseissa että antropogeenisesti. Osa kasvihuonekaasuista, kuten halogenoidut hiilivedyt, ovat täysin synteettisiä. (IPCC 2007, s. 100) Merkittävimmäksi kasvihuonekaasuksi voidaan kuitenkin nimittää hiilidioksidia, joka muodostaa jopa 76 % globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä (IEA 2017, s. 3).

Tärkein vaikuttaja kasvihuonekaasupitoisuuksien nousuun on energiantuotantosektori, joka fossiilisten polttoaineiden hyödyntämisen seurauksena kasvattaa erityisesti hiilidioksidin määrää ilmakehässä (Höök & Tang 2013). Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi käynnissä on globaali energiamurros, jolla viitataan energiantuotanto- ja kulutusjärjestelmien kokonaisvaltaiseen muutokseen esimerkiksi uusiutuvan energian tuotanto-osuuksia lisäämällä (Kivimaa 2018). Myös vuonna 2015 ratifioitun valtiodenvälisen Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet keskilämpötilan nousun hillitsemiseksi alle 1,5 asteeseen esitteolliseen aikaan verrattuna edellyttävät fossiilisista polttoaineista luopumista nopealla aikataululla (Kefford et al. 2018).

Muuttuva energiajärjestelmä asettaa uusia vaatimuksia myös sähkönsiirtoverkolle. Tuotannoltaan epäsäännöllisten ja sijainniltaan hajanaisempien uusiutuvien energialähteiden kapasiteetin lisääntymiseen ollaan valmistauduttu eurooppalaisissa sähkönsiirtojärjestelmissä yhteensä yli sadan miljardin euron investoinnein (Jorge & Hertwich 2014). Tämä tarkoittaa käytännössä selkeää kasvua voimajohtojen kokonaispituudessa ja niihin liittyvän infrastruktuurin määrässä (Denny et al. 2010; Hertwich et al. 2015; Jorge & Hertwich

2014; Tusconi et al. 2014). Sähkön siirron infrastruktuurin rakentaminen ja sitä ympäröivät toiminnot tuottavat kuitenkin myös itsessään runsaasti kasvihuonekaasupäästöjä (Harrison et al. 2010), mikä vaikuttaa osaltaan koko energiasäätelmän kokonaispäästöihin. Tästä syystä siirtojärjestelmän ilmastovaikutusten tunteminen on yhä tärkeämpää tulevana vuosikymmeninä.

Suomessa sähkönsiirtoverkon runkoa eli niin kutsuttua kantaverkkoa ylläpitää valtion osaomisteinen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Yritysmaailmassa yleinen tapa arvioida toiminnan ilmastovaikutuksia on hiilijalanjäljen laskenta, jota Fingrid on toteuttanut vuodesta 2011 lähtien (S. Vuorikoski, haastattelu 4.8.2018). Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen, palvelun tai toiminnan elinkaaren aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää, joka voidaan edelleen jakaa suoriin ja epäsuoriin päästöihin. Suorat päästöt syntyvät yhtiön omasta toiminnasta, kuten sen omistuksessa olevan kaluston käyttämien polttoaineiden palamisprosessista. Epäsuorat päästöt puolestaan ovat seurausta yhtiön toiminnasta, vaikka itse päästölähde ei ole suoraan yrityksen kontrolloitavissa. (GHG Protocol 2011). Pitkät ja polveilevat arvoketjut asettavat haasteita yrityksen epäsuorien päästöjen kokonaisvaltaiselle laskennalle, sillä niiden arviointi vaatii usein tarkastelun laajentamista yrityksen oman toiminnan ulkopuolelle. Yhtiön kasvihuonekaasupäästöjen tarkka määrittäminen on tärkeää niin tehokkaan ilmastopolitiikan soveltamisen kuin taloudellisten näkökohtien kannalta (Aichele & Felbermayr 2012; GHG Protocol 2011), minkä vuoksi aikaisempia tuloksia haluttiin tarkentaa.

Sähköverkon kasvihuonekaasupäästöjä arvioiva tutkimus on runsasta, mutta lähes järjestäen painopiste on ollut energiantuotannon päästöissä sähkönsiirron ilmastovaikutusten jäädessä vähemmälle huomiolle (Harrison et al. 2010; Jorge & Hertwich 2013). Myös eurooppalaisissa kantaverkkoyhtiöissä koko arvoketjun kattavia hiilijalanjälkianalyyskejä on tehty vain muutamia (kts. REE 2018; Elia 2018). Tässä työssä pyritään arvioimaan kantaverkkoyhtiön epäsuorien kasvihuonekaasupäästöjen määrää sekä löytämään uusia päästövähennyiskohteita. Tutkimuskysymykset ovat:

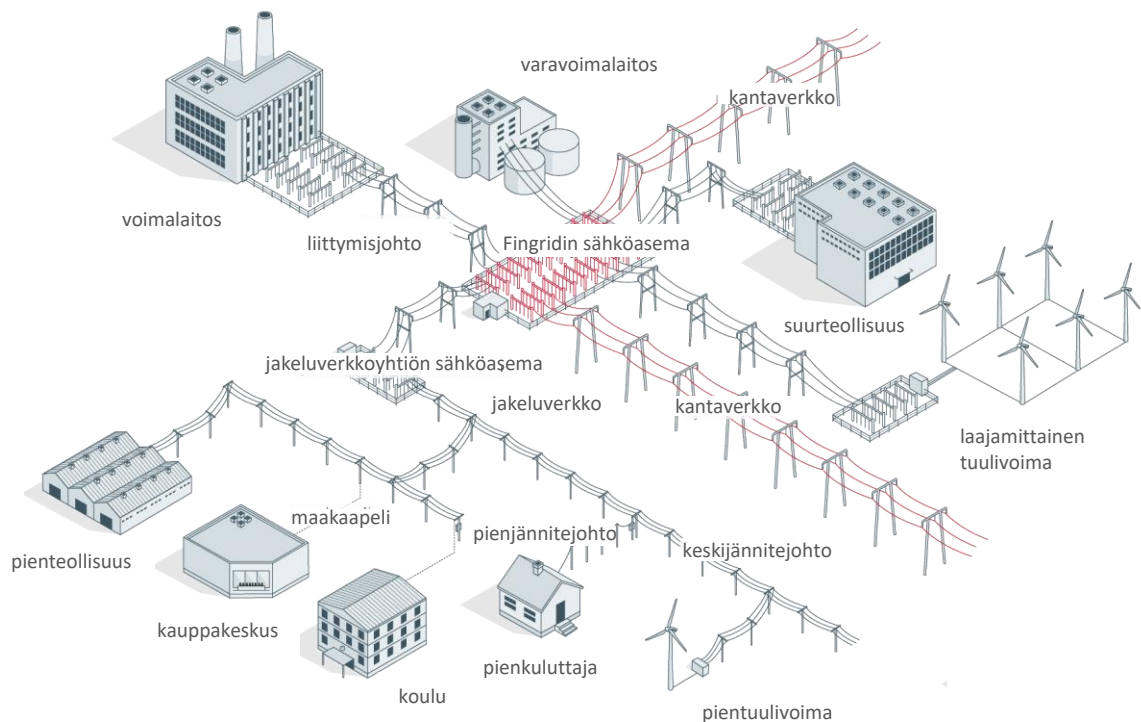
1. Mitä ovat Fingrid Oyj:n epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt?
2. Kuinka kasvihuonekaasupäästöjä voidaan mitata ja mitkä päästölähteistä ovat merkittävimpiä yhtiön päästövähennystavoitteiden kannalta?
3. Kuinka päästövähennyksiä voidaan toteuttaa yhtiössä tehokkaasti epäsuorien päästöjen kohdalla?

Epäsuorien päästöjen määrittämisproseduurina hyödynnetään GHG Protocolin (2011) *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard* -ohjetta. GHG Protocolin lisäksi työssä esitellään lyhyesti Suomen kantaverkko komponentteineen sekä toinen merkittävä hiilijalanjäljen laskentaohje, ISO 14064-1-standardi (ISO 2012), joka sisältää paljon yhteneväisyyksiä GHG Protocolin materiaalin kanssa. Tämän jälkeen Fingridin hiilijalanjälkeä arvioidaan päästölähteittäin ja tuloksia tarkastellaan päästövähennysmahdollisuuksia silmällä pitäen.

## 2. SUOMEN KANTAVERKKO

Kantaverkko on Suomen voimajärjestelmän runko, jota pitkin siirretään suurin osa maassa kulutetusta sähköstä. Kantaverkkoon kuuluu sähkönsiirrosta huolehtivia 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n korkeajännitejohtoja. Korkeajännitejohdot siirtävät sähköenergiaa voimalaitoksilta suurteollisuuteen ja alueellisesta sähkönjakelusta huolehtiviin jakeluverkkoihin. (Fingrid 2018h) Vuonna 2017 Suomen kantaverkkoon kuuluu yhteensä noin 14 400 km korkeajännitejohtoja sekä 119 sähköasemaa, jotka toimivat virranjakajina ja -muuntajina verkon solmukohdissa (Fingrid 2018j).

Suomessa kantaverkkoa hallinnoi Fingrid Oyj, jonka vastuulla ovat kantaverkon valvonta, suunnittelu, kehittäminen sekä ylläpito (Fingrid 2018h). Fingridin vastuu sähköjärjestelmän toimivuudesta pohjautuu sähkömarkkinalain perusteella myönnettyyn sähköverkkolupaan (L. 9.8.2013/588). Varsinaisen kantaverkon lisäksi Fingrid omistaa kymmenen ja hallinnoi pitkäaikaisilla käyttöoikeussopimuksilla seitsemää varavoimalaitosta, jotka voidaan käynnistää verkon häiriötilanteissa. Varavoimalaitokset vastaavat Fingridin velvoitteesta ylläpitää nopeaa häiriöreserviä, vaikka ne eivät ole teknisesti varsinaisen osa kantaverkkoa. Yhteensä laitosten kapasiteetti on yli 1 000 MW. (Fingrid 2018i)



**Kuva 1.** Suomen voimajärjestelmä (mukaillen Fingrid 2018f).

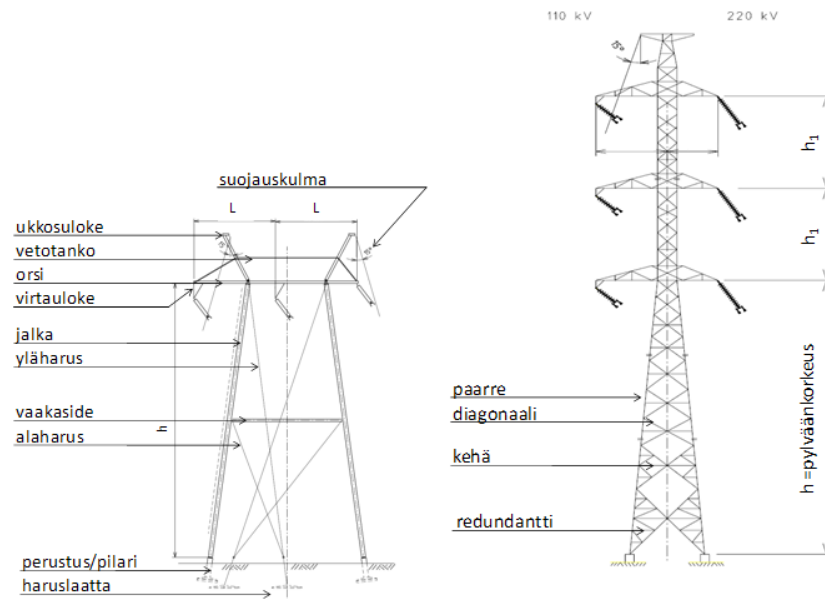
Suomen kantaverkko kuuluu yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan kanssa yhteispohjoismaiseen synkroniseen sähköjärjestelmään, jonka sisällä verkko toimii samalla taajuudella mahdollistaen vaihtosähköyhteydet maiden välillä. Pohjoismaisesta verkosta on tasasähköyhteyksiä muualle Eurooppaan. Suomen kantaverkko on kytketty suoraan tasasähkökaapeleilla Ruotsin, Venäjän ja Baltian voimajärjestelmiin. Suurin osa Suomen ulkopuolelle ulottuvista rajajohdoista on Fingridin hallinnoimia. (Elovaara & Haarla 2011, s. 61–63; Fingrid 2018g)

## 2.1 Siirtoverkon komponentit

Siirtoverkon näkyvimpiä komponentteja ovat voimajohdot, jotka voivat olla joko ilmajohtoja tai kaapeleita. Avojohto on erityisnimitys päällystämättömille ilmajohdoille, joissa jokainen johdin on kiinni eristimissä tai muissa kiinnikkeissä. Avojohto on kantaverkon yleisin johdintyyppi. Voimakaapeliksi kutsutaan eristettyä ja suojaavan vaipan ympäröimää maahan tai veteen upotettua johdinta (Jalonen 2011, s. 347, 370) Fingridin omistuksessa on yhteensä vain noin 320 km kaapeleita, josta suurimman osan muodostavat kantaverkon ulkomaanyhteydet Ruotsiin ja Viroon (Fingrid 2018d). Sähköasemien yhteydessä on käytössä lyhyitä voimakaapelisovelluksia (Jalonen 2011, s. 371).

Ilmajohdosta kannattelevat pylväät rakennetaan teräksestä tai alumiinista, joista jälkimmäistä käytetään huomattavasti harvemmin. Pylväiden materiaalina on käytetty aikaisemmin myös kyllästettyä puuta. Pylväiden tyyppi vaihtelee perustuspaikan ja johdintyyppin mukaan. Suurin osa suurjänniteverkon pylväistä on harustettuja pylväitä. Harustettu pylväs on tuettu haruksilla. Rakenteeltaan raskaamman ja kalliimman vapaasti seisovan pylvään etuna on sen vaatima harustettua pylvästä kapeampi johtoalue. Se sopii myös käytettäväksi isoilla pylväskulmilla. (Elovaara & Haarla 2011, s. 250, 351). Kuvassa 2 on esitetty rakennekuvat harustetusta ja vapaasti seisovasta voimajohtopylväästä. Vapaasti seisovan pylvään erityistapauksia ovat maisemallisesti herkissä kohteissa tai muissa erityistapauksissa käytettävä maisemapylväs ja nelijalkainen peltopylväs, joka on suunniteltu minimoimaan voimajohtojen maanviljelylle aiheuttamat haitat (kuva 3).

Voimajohtojen perustukset ovat teräsbetonia. Perustukset toteutetaan joko valmiilla perustuselementeillä tai valamalla ne pystytyspaikalla. Valamalla perustetaan harustettuja pylväitä raskasrakenteisempia vapaasti seisovia pylväitä. Valetun perustuksen massa on elementtiperustuksia suurempi. Pehmeillä paikoilla perustuspaikka joudutaan perustuksen yhteydessä paaluttamaan. Harustetun pylvään perustukset kattavat molempien jalkojen alla olevien perustuselementtien lisäksi haruslaatat, jotka upotetaan maahan harusvairin kiinnityskohtaan. (Jalonen 2011, s. 253)



**Kuva 2.** Harustettu (vas.) ja vapaasti seisova pylväs (Jalonen 2011).



**Kuva 3.** Maisema- ja peltopylväs (oik.) (Fingrid 2018c; Fingrid 2018e).

Suurjänniteverkossa suurin osa johtimista on teräsvahvisteisia alumiinijohtimia eli niin kutsuttuja ACSR-johtimia. Sähköasemien läheisyydessä käytetään alumiini- (ACC) sekä alumiiniseosjohtimia (AAAC). Osana johdon maadoitusverkkoa toimivat myös virtajohdinten yläpuolelle asennettavat ukkosjohtimet, jotka ovat usein teräsvahvisteisia alumiiniseosjohtimia (AACSR). Lisäksi osa ukkosjohtimista sisältää valokuitusydämen, joka vastaa verkon sisäisen viestinnän ohella muusta teleliikennetoiminnasta. Näitä johtimia kutsutaan OPGW-johtimiksi. (Jalonen 2011, s. 357, 359, 366)

Sähköaseman päätehtävänä on muuntaa virtaa sekä jakaa sitä eri jännitetasojen välillä, mikä toteutetaan tehonmuuntajien avulla (Gargiulo et al. 2017). Toinen sähköasemilta löytyvä muuntajatyyppe on mittamuuntaja, joka on suunniteltu alentamaan jännite ja virta mittalaitteille sopivaksi (Kuosa 2011, s. 440). Johdot ja muuntajat liitetään kokoojakiskostoihin, jotka mahdollistavat erilaiset kytkentäratkaisut tehonsiirtotilanteesta riippuen (Elovaara & Haarla 2011, s. 102). Kytinlaite on yleisnimike katkaisijoille ja erottimille, joiden avulla virtapiirejä kytketään tai erotetaan toisistaan (Laitinen 2011, s. 457).

Sähköasemat voidaan toteuttaa joko avorakenteisina tai kaasueristeisinä GIS-laitoksina. Avorakenne vaatii enemmän tilaa kuin eristetty ratkaisu, jolloin sen kannattavuus riippuu tonttimaan riittävydestä ja hinnasta. (Naumanen 2011, s. 408–411) Avorakenteisilla asemilla kytkinlaitteisto on rakennettu ulos kytkinkentille (kuva 4). Yleisesti eristekaasuna käytetty rikkiheksafluoridi ( $\text{SF}_6$ ) on hyvien sähköisten ominaisuuksiensa ohella voimakas kasvihuonekaasu (kts. alaluku 3.1 *Lämmityspotentiaali GWP*). Muun muassa tämä seikka on herättänyt keskustelua kaasun korvaamisesta ympäristöystävällisemmällä vaihtoehdolla. (Beroual & Haddad 2017; Mazzanti et al. 2016) Valtaosa Fingridin sähköasemista on ilmaeristeisiä ja vuonna 2018 kaasueristettä hyödyntäviä kytkinlaitoksia oli verkossa vain 13 kappaletta (Fingrid 2018d).



*Kuva 4. Kytkinkenttiä Karjaan sähköasemalla (Fingrid 2018f).*

## 2.2 Siirtoverkon ympäristövaikutukset

Kantaverkon rakentamisesta, käytöstä ja ylläpidosta aiheutuu ympäristövaikutuksia. Ympäristövaikutusten hallinta on tärkeä osa kantaverkkoyhtiön toimintaa, johon myös lainsäädäntö velvoittaa jo verkon suunnitteluvaiheessa. Suomessa voimajohtohankkeiden vaikutukset tulee selvittää lainsäädännön mukaan joko ympäristövaikutusten arviointimenettelyllä tai ympäristöselvityksellä. (Kuitunen & Penttilä 2011, s. 283–284; L. 5.5.2017/252)

Sähkön siirrolla itsellään sekä siihen liittyvillä toiminnoilla on ilmastovaikutuksia, joista merkittävimpiä ovat siirron energiahäviöitä kompensoivan energiantuotannon päästöt (Fingrid 2018k). Myös muista kantaverkkoon liittyvistä toiminnoista, kuten infrastruktuurin rakennuttamisesta, aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä. Kantaverkon rakentaminen on materiaali-intensiivistä toimintaa, joka kuluttaa komponenttien valmistamisen yhteydessä käytetyn energian ohella runsaasti luonnonvaroja (Jorge & Hertwich 2014).

Voimajohtorakentaminen asettaa maankäytölle rajoituksia, sillä voimajohtoalueella ei voi pääsääntöisesti olla muita rakennelmia. Lisäksi voimajohdot aiheuttavat maisemalli-

sia muutoksia, jotka korostuvat erityisesti voimakkaasti rakennettujen alueiden ulkopuolella. (Fingrid 2018k) Lunastettavien johtokäytävien leveydet pyritään pitämään mahdollisimman kapeina haitan minimimiseksi (Kuitunen & Penttilä 2011, s. 283).

Voimajohtojen luontovaikutukset ovat suurimmillaan metsäekosysteemissä. Puuttomilla alueilla, kuten niityillä tai avosoilla, niiden ekologiset vaikutukset saattavat jäädä hyvin pieniksi. Erityisesti vanhaa tai varttunutta metsää elinympäristönään suosivat lajit voivat kärsiä linjojen rakentamisesta. Johtoaukeat aiheuttavat elinympäristöjen pirstoutumista, mutta lisäävät samanaikaisesti luonnon monimuotoisuutta säännöllisen raivauksen myötä avoimina pysyvien johtoaukeiden ansiosta. Niittyalan vähenemisestä kärsineille lajeille avoimet johtoaukeat ovat tärkeä korvaava elinympäristö. (Seppänen 2011, s. 293)

Varavoimailaitoksilla varastoidaan merkittäviä määriä polttoaineita sekä kemikaaleja. Esimerkkejä näistä ovat muuntajaöljy, kondensaattorinesteet, akkuhappo sekä glykoli, joista osa on haitallista vuotaessaan ympäristöön. Sähköasemilla eristys- ja jäähdytysaineen käytettävä SF<sub>6</sub> on paitsi voimakas kasvihuonekaasu myös hajotessaan myrkyllisiä ja syövyttäviä aineita tuottava yhdiste. Kaikkea rakentamista rajoitetaan pohjavesialueilla mahdollisten ympäristöriskien vuoksi. (Vuorikoski 2011, s. 314–315)



### 3. HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA

Hiilijalanjälki mittaa tuotteen, palvelun tai toiminnan elinkaaren aikana ilmakehään vapautuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrää (SYKE 2013). Hiilijalanjäljen käsite on esiintynyt kirjallisuudessa ensimmäistä kertaa jo 1990-luvun puolivälissä ekologisen jalanjäljen alakäsitteenä (Wackernagel & Rees 1996), minkä jälkeen sen sisältö on muokautunut soveltumaan paremmin ihmisen toiminnallaan aiheuttamien ilmastomuutosvaikutusten määrälliseen arviointiin. Hiilijalanjäljen tarkempi määritelmä vaihtelee kuitenkin suuresti raportoinnin luonteen mukaan, ja esimerkiksi kohteen rajaustavalle tai tutkimuksessa huomioituille kasvihuonekaasuille ei ole virallista ohjeistusta (Onat et al. 2014).

Tuotteen tai palvelun elinkaarella viitataan kaikkiin sen valmistamiseen, käyttöön tai hävittämiseen liittyviin prosesseihin aina raaka-aineiden hankinnasta tuotteen hylkäämiseen asti. Hiilijalanjälkilaskennan perustana oleva elinkaariarviointi (engl. life cycle analysis, LCA) antaa tietoa useista tutkimuskohteen elinkaaren aikana aiheutuneista ympäristövaikutuksista, joista hiilijalanjälki kuvaa ainoastaan ilmastomuutosvaikutusta. (ISO 14040 2006; Seppälä et al. 2009, s. 72) Menetelmä, jossa ympäristövaikutusten tarkastelu typistetään vain yhteen indikaattoriin, on herättänyt myös kritiikkiä, ja sen soveltuvuutta tulisiikin aina miettiä tapauskohtaisesti. Toisaalta yksinkertainen indikaattori mahdollistaa viestimisen suurelle yleisölle ymmärrettävällä tavalla, eikä sen tulkinta edellytä erityisiä lähtötietoja. Tämä on osaltaan ollut syynä hiilijalanjälkilaskennan kehittymisen yritysveitoisuuteen ja sen käytön suosioon yksityisellä sektorilla. (Weidema et al. 2008)

Hiilijalanjälkianalyysi toimii käyttökelpoisena välineenä yrityksen kasvihuonekaasupäästöjen määrän ja laadun arvioinnille, joka on välttämätöntä päästöjen hallinnan ja vähentämisen kannalta. Toiminnan päästöjen kartoittaminen voi olla merkittävä kilpailuetu ympäristönäkökohtien noustessa yhä tärkeämpään rooliin kaikilla markkina-alueilla. Indikaattorin näennäisestä yksinkertaisuudesta huolimatta onnistunut laskenta edellyttää usein työn ulottamista myös yrityksen oman toiminnan ulkopuolelle. Ulkopuolisia toimijoita kattavien tuotantoketjujen merkitys on usein suuri yrityksen kokonaispäästöjen kannalta, mikä monimutkaistaa laskentaa huomattavasti. Tosin laskennan toteuttaminen jo itsessään johtaa arvoketjujen systemaattiseen tarkasteluun ja voi paljastaa kehittämistarpeita sekä strategisella että operationaalisella toiminnan tasolla. (Carbon Trust 2007; GHG Protocol 2011; Antikainen & Seppälä 2012)

#### 3.1 Lämmityspotentiaali GWP

Hiilijalanjäljen suuruus ilmoitetaan yleensä hiilidioksidiekvivalentteina (CO<sub>2</sub>-ekv), joilla kasvihuonekaasujen ilmastomuutosvaikutuksia on mahdollista yhteismitallistaa (GHG Protocol 2004, s. 97). Kasvihuonekaasut voidaan muuntaa hiilidioksidiekvivalenteiksi



niiden lämmityspotentiaalien (engl. global warming potential, GWP) avulla. Kullakin kasvihuonekaasulla on oma GWP-kertoimensa, jonka suuruus perustuu sen aiheuttamaan säteilypakotteeseen. Säteilypakote kuvaa aineesta aiheutuvan nettosäteilyn eli maan ilmakehään absorboituvan ja avaruuteen poistuvan säteilyn erotuksen määrää, ja sen voimakkuus on yksi käytetyimmistä ilmastomuutosvaikutusten mittareista. (IPCC 2013, s. 664) Kasvihuonekaasupäästöt eli hiilidioksidiekvivalenttien määrä (kg CO<sub>2</sub>-ekv) voidaan laskea kaavalla 1.

$$\text{Kasvihuonekaasupäästöt} = m \times GWP, \quad (1)$$

jossa  $m$  on kaasun massa (kg) ja  $GWP$  lämmityspotentiaali.

Kasvihuonekaasujen eliniät ilmakehässä vaihtelevat päivistä satoihin vuosiin, mikä vaikuttaa niiden lämmityspotentiaalien muuttumiseen ajan suhteen (IPCC 2013, s.731–737). Valtioidenvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) julkaisee arviointiraporteissaan GWP-kertoimia eri aikaväleille. Niistä tuoreimmat, viidennessä arviointiraportissa esitetyt lukemat Kioton pöytäkirjan eli erillisen YK:n ilmastositomusta tarkentavan päästövähennyssopimuksen määrittämille kasvihuonekaasuille on esitetty taulukossa 1. Päästövähennyksiin liittyvät tavoitteet koskivat alun perin kuutta kasvihuonekaasua (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>), ja seitsemäs kaasu, typitrifluoridi (NF<sub>3</sub>), lisättiin sopimukseen sen toisella velvoitekaudella (UN 2012).

**Taulukko 1.** *Kioton pöytäkirjan määrittämien kasvihuonekaasujen lämmityspotentiaalit (IPCC 2013, s. 731–737).*

Kasvihuonekaasu	Elinikä (a)	GWP20	GWP100
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	*	1	1
Metaani (CH <sub>4</sub> )	12,4	84	28
Dityppioksidi (N <sub>2</sub> O)	121	264	265
Fluorihiiilivedyt (HFC)	2,1 d – 222	<1–10 800	<1–12 400
Perfluorihiiilivedyt (PFC)	1,1 d – 50 000	<1–8210	<1–11 100
Rikkiheksafluoridi (SF <sub>6</sub> )	3200	17 500	23 500
Typitrifluoridi (NF <sub>3</sub> )	500	12 800	16 100

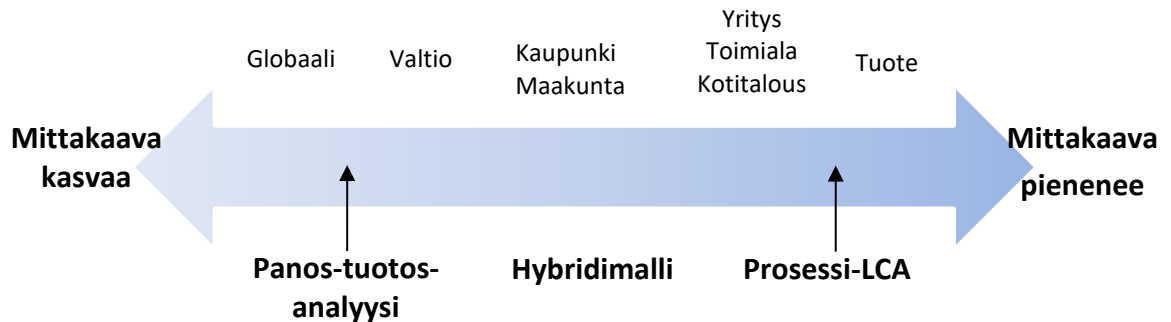
\* Elinikä vaihtelee hiilikierron mukaan

Taulukosta 1 voidaan havaita, että pitkällä aikavälillä pitkäikäisten kaasujen ilmastomuutosvaikutus kasvaa ja lyhytikäisten kaasujen vaikutus pienenee. Yleisimmin käytetty aikaväli GWP-arvoille on 100 vuotta (GWP100), jota myös hiilijalanjäljen laskentaa ohjaavat standardit hyödyntävät (ISO 14064-1 2012, GHG Protocol 2011).

### 3.2 Laskentamenetelmät

Hiilijalanjäljen laskenta mukaillee elinkaarianalyysissä hyödynnettyjä menetelmiä. Näistä keskeisiä ovat yksikköprosesseja tarkasteleva prosessipohjainen elinkaarimallinnus, rahapanosten ja ympäristövaikutusten välistä suhdetta mallintava panos-tuotosanalyysi

sekä näitä yhdistelevä hybridimalli. Sopivat sovelluskohteet vaihtelevat menetelmästä toiseen, ja esimerkiksi yksittäisen tuotteen tai kokonaisen kaupunkikeskittymän hiilijalanjäljen arviointi edellyttää hyvin erilaisia menettelytapoja. Lähtökohtana voidaan pitää siirtymistä prosessipohjaisesta elinkaariarviosta panos-tuotosanalyyysiin tutkimuksen mittakaavan laajetessa kuvan 5 mukaisesti. Hybridimalli sopii joustavasti monen kokoluokan tarkasteluihin. (Peters 2010)



*Kuva 5. Hiilijalanjäljen laskentamenetelmät sovelluskohteittain (mukaillen Peters 2010).*

Laskentatavan valinnassa on useita huomioitavia seikkoja, joita ovat muun muassa päästölähteen arvioitu merkittävyys, saatavilla olevien lähtötietojen määrä ja laatu sekä laskentatyöhön käytössä olevat resurssit. Laskentamenetelmää voidaan myös muuttaa kuhunkin päästölähteeseen sopivaksi, jolloin kokonaisarvio kohteen hiilijalanjäljestä on toteutettu useammalla erilaisella laskentatavalla. (GHG Protocol 2011)

Kasvihuonekaasupäästö määrät (kg CO<sub>2</sub>-ekv) päästölähteittäin voidaan laskea käyttämällä aktiivisuusdataa ja toimintojen päästökertoimia seuraavasti:

$$\text{Kasvihuonekaasupäästöt} = A \times E, \quad (2)$$

jossa  $A$  (esimerkiksi kg/kWh/l/km/€) on päästölähteen aktiivisuusdata ja  $E$  (esimerkiksi kg CO<sub>2</sub>-ekv per kg/kWh/l/km/€) päästökerroin.

### 3.2.1 Prosessi-LCA

Prosessipohjainen elinkaarimallinnus eli prosessi-LCA perustuu yhden tai useamman yksikköprosessin ympäristövaikutusten arviointiin (Hendrickson et al. 2006, s. 23). Prosessi-LCA:n lähtötiedot voivat olla esimerkiksi tuotannossa käytettyjä materiaali- tai toiminnan energiankulutustietoja, joihin ilmastonmuutosvaikutukset ovat suoraan verrannollisia päästökertoimen määrittämässä suhteessa. Menetelmällä saadut tulokset ovat tarkkoja, sillä laskenta toteutetaan pienissä osissa ja usein systeemiin yksityiskohtaisesti perehtyen (Onat et al. 2014).

Prosessi-LCA:n heikkouksia ovat tarvittavien lähtötietojen suuri määrä ja tutkimuksen rajaukseen liittyvät haasteet. Menetelmän toteuttaminen laajalle systeemille on hyvin työlästä ja vaatii runsaasti resursseja. Kaventamalla tutkimusrajausta laskentaa voidaan luonnollisesti helpottaa, mutta samalla vaikutetaan suoraan saatuihin tutkimustuloksiin: tuloksissa näkyvät laskennan tekijän subjektiivisesti asettamat rajat. Prosessi-LCA:ta hyödyntämällä lasketut ympäristövaikutukset ovat lähes järjestäen matalampia muihin tarkastelutapoihin verrattuna, mitä kutsutaan niin sanotuksi katkaisuvirheeksi (engl. transaction error). (Heinonen & Junnila 2011; Junnila 2006)

### 3.2.2 IO-LCA

Panos-tuotoselinkaarimallinnus (engl. input-output LCA) eli IO-LCA hyödyntää kansantaloudellisia malleja rahapanosten ja niistä aiheutuvien ympäristövaikutusten yhteyden arvioinnissa (Peters & Solli 2010). Menetelmä pohjautuu kansantalouden tilinpidossa käytettyyn panos-tuotoskirjanpitoon, johon on elinkaarimallinnuksen yhteydessä lisätty arvio kunkin sektorin aiheuttamasta ympäristökuormasta (Heinonen & Junnila 2011). IO-LCA:lla voidaan tarkastella laajojen, useita osaprosesseja kattavien kokonaisuuksien ympäristövaikutuksia, joiden selvittäminen prosessipohjaisesti vaatisi kohtuuttomia resursseja. Myös tutkimuskohteen rajauksen vaikutus tuloksiin vähenee. (Onat et al. 2014) Lähtötiedot ovat prosessipohjaista mallinnusta helpommin saatavilla ja itse laskennan suorittaminen on nopeaa (Säynäjoki et al. 2011, s. 7).

IO-LCA:n käyttö edellyttää useiden, hyvinkin erilaisten prosessien yhdistämistä samalla sapluunalla arvioituun sektoriin (Junnila 2006). Näin tulosten tarkkuus kärsii ja osa yhteiseen sektoriin upotetuista päästöintensiteivisistä toiminnoista voi jäädä yksilöimättä. Lisäksi saatavilla olevasta sektoridatasta valtaosa perustuu Yhdysvaltojen kansantalouteen (Säynäjoki et al. 2011, s. 9), mikä lisää saatujen tulosten epätarkkuutta muilla alueilla. Myös valuuttakurssien heilahtelu aiheuttaa vääristymiä tuloksissa.

### 3.2.3 Hybridi-LCA

Hybridielinkaarimallinnus eli hybridi-LCA pyrkii laskentametodeja yhdistämällä hyödyntämään prosessi- ja panos-tuotosmallin parhaat puolet ja minimoimaan niiden rajoitusten vaikutuksia tuloksiin. IO-LCA yksinkertaistaa mallinnusta ja mahdollistaa laajempialaisen analyysin tekemisen. Toisaalta prosessi-LCA:ta hyödyntämällä tuloksia voidaan tarkentaa halutuilta osin. (Zhang et al. 2015) Hybridimalli voi joko yhdistellä fyysisiä ja taloudellisia yksiköitä toisiinsa tai vaihtoehtoisesti käyttää lähtötietoina sekä sektori- että prosessidataa (Säynäjoki et al. 2011, s. 13). Yleisimmin käytetty laskentatapa on kerrostettu hybridi-LCA, jossa prosessi- tai panos-tuotosdatan puutteita korvataan paikallisesti toisella lähtötietotyypillä (Crawford et al. 2018).

Vaikka hybridi-LCA vähentää prosessi- ja IO-LCA:ssa esiintyviä epävarmuustekijöitä, se ei poista niitä kokonaan. Molempien mallien heikkoudet on otettava huomioon myös

tässä laskentatavassa, vaikka niiden yksittäinen painarvo vähenee. Se, miten lähtötietojen käsittely jaetaan prosessi- ja IO-pohjaisen tarkastelun välillä, vaikuttaa osaltaan tuloksiin. (Säynäjoki et al. 2011, s. 15; Williams et al. 2009; Zhang et al. 2015) Lisäksi spesifin prosessidatan yhdistäminen laaja-alaisiin taloudellisiin malleihin saattaa aiheuttaa päällekkäisyyksiä päästölaskennassa (Strømman et al. 2009).

### 3.3 Standardit

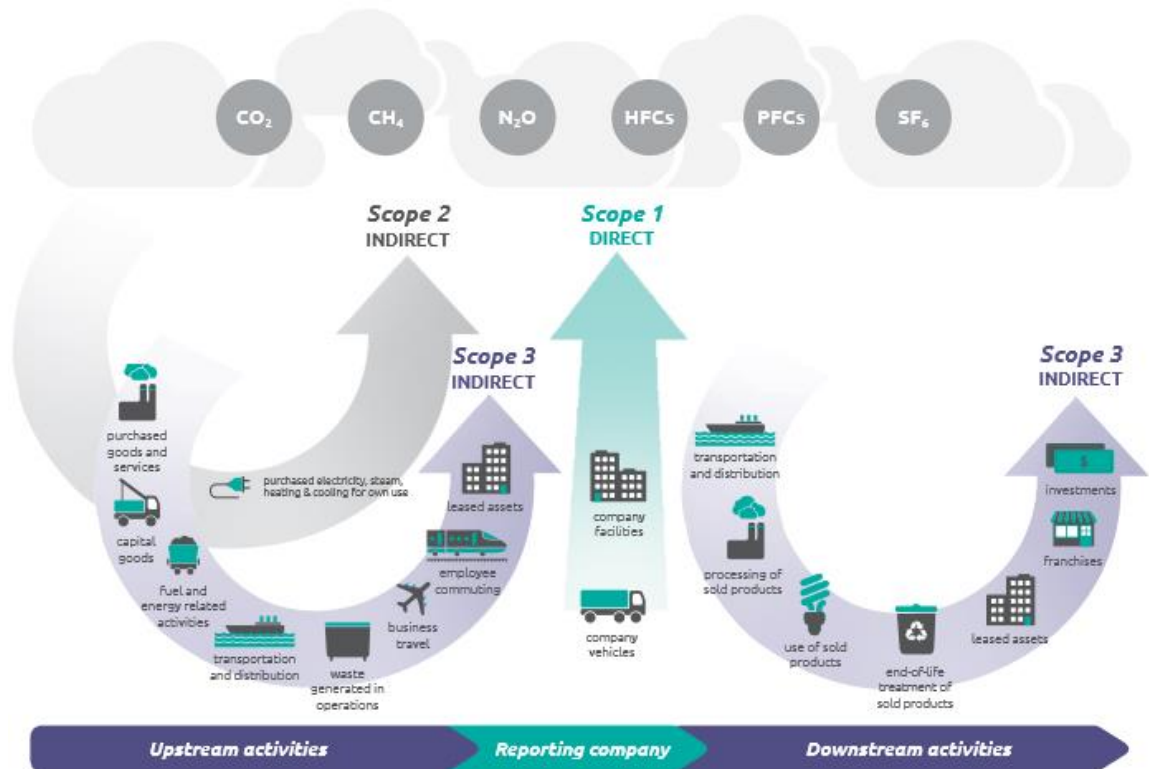
Seuraavissa alaluvuissa esitellään kaksi johtavaa yrityksen hiilijalanjäljen määrittämisen tueksi soveltuvaa laskenta- ja raportointiohjeistoa. GHG Protocolin ja ISON julkaisut eivät ole sisällöllisesti ristiriidassa keskenään, vaan niitä voidaan käyttää toisiaan täydentävinä kokonaisuuksina yrityksen kasvihuonekaasuraportoinnin pohjalla (ISO 2007). Voidaankin sanoa, että GHG Protocolin ohjeistukset tarjoavat rungon raportoinnille ja ISON standardit puolestaan mallin tutkimuksen metodologialle (Peters & Solli 2010, s. 31).

#### 3.3.1 GHG Protocolin raportointiohjeet

The Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) on asiantuntijaorganisaatio, joka tarjoaa standardeja sekä laskentatyökaluja kasvihuonekaasupäästöjen raportointiin yksityisille ja julkisille toimijoille (GHG Protocol 2011, s. 4). GHG Protocolin perustajajärjestöjen World Resources Instituten ja World Business Council for Sustainable Developmentin yhteistyön tuloksena syntyneet ohjeistukset ovat nousseet kansainvälisesti eniten käytetyiksi kasvihuonekaasupäästöjen raportointimenetelmiksi viimeisen 20 vuoden aikana (Hickmann 2017). Proseduurien suunnittelun tavoitteena on luoda yhtenäinen ja tutkimustietoon perustuva menettelytapa kasvihuonekaasupäästöjen määrittämiselle, ja sitä kautta ohjata organisaation päästövähennyksiin sekä ilmastoriskeihin liittyvää päätöksentekoa (Sundin & Ranganathan 2002). GHG Protocolin standardit kattavat kaikki seitsemän Kioton pöytäkirjan määrittämää kasvihuonekaasua, joista viimeisin, pöytäkirjaan toisella määrittäyskaudella sisällytetty typpitrifluoridi (NF<sub>3</sub>) lisättiin GHG Protocolin raportointivaatimukseen vuonna 2016 (UN 2012; GHG Protocol 2013). Kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen määrät tulee ilmaista raportoinnissa hiilidioksidiekvivalentteina (GHG Protocol 2011, s. 6).

GHG Protocol jakaa kasvihuonekaasupäästöt karkeasti kahtia suoriin ja epäsuoriin päästöihin, joista jälkimmäistä tarkennetaan edelleen ryhmittelyllä ostoenergian ja arvoketjun muihin epäsuoriin päästöihin kuvan 6 mukaisesti. Suoriin, ostoenergian käyttöön ja muihin arvoketjun vaiheisiin liittyviin epäsuoriin päästöihin viitataan englanniksi termeillä *scope 1*, *2* ja *3*, jotka ovat vakiintuneet yleisesti käytetyiksi käsitteiksi alan kirjallisuudessa. Tässä työssä käytetään jatkossa suomenkielistä käännöstä *laskentataso*.

Yrityksen suorat eli ensimmäisen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt kattavat ne päästöt, joiden päästölähde on joko yhtiön omistuksessa tai muuten hallinnoima. (GHG Protocol 2011, s. 27) Esimerkkejä suorista päästöistä ovat yhtiön omalla laitteistollaan tuotaman energian tai sen omistuksessa olevien ajoneuvojen käytön päästöt. Epäsuoria päästöjä käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.4 *Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt*. GHG Protocolin (2011, s. 60) mukaan biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä tai yhtiön toiminnan aikaansaamia päästövähennyksiä ei tule sisällyttää samaan raportointiin muiden kasvihuonekaasupäästöjen kanssa.



**Kuva 6.** Kasvihuonekaasupäästöjen GHG Protocolin mukaiset laskentatasot (GHG Protocol 2011, s. 5).

GHG Protocolin standardeissa esitetään viisi periaatetta hiilijalanjäljen laskennalle ja raportoinnille: relevanssi, täydellisyys, läpinäkyvyys, jatkuvuus ja tarkkuus. Reaalitytilanteessa yhden laskentaperiaatteen toteuttaminen saatetaan joutua kuitenkin tekemään jonkun toisen periaatteen kustannuksella. Mahdollisimman kattavaan ja kokonaisvaltaiseen raportointiin pyritäessä mukaan on ehkä otettava myös vähemmän tarkkoja lähtötietoja. Vastaavasti tavoiteltaessa ehdottoman täsmällistä hiilijalanjälkiarviota joitakin päästölähteitä voidaan joutua jättämään pois lähtötietojen puutteiden takia. Nämä kompromissit toteutetaan yhtiön määrittelemien päästölaskennan tavoitteiden mukaisesti. (GHG Protocol 2011, s. 23–24)

Olennaisena osana GHG Protocolin standardien soveltamista on yhtiön organisatoristen rajojen asettaminen (GHG Protocol 2011, s. 28). Ongelmakohtiksi laskennan kannalta voivat osoittautua esimerkiksi yhteisomistuksessa olevat tuotantovälineet tai tytäryhtiöt

(Hickmann 2017). Yrityksellä on kolme mahdollista rajausten menetelmää, joista ensimmäinen perustuu puhtaasti yhtiön omistussuhteisiin, toinen päästölähteen taloudelliseen ja kolmas toiminnalliseen hallintaan (GHG Protocol 2011, s. 29). Tämä valinta vaikuttaa päästölaskennan tuloksiin erityisesti niissä yhtiöissä, joissa omistus on hajautunut (Pinkse & Kolk 2009).

Yhtiön organisatoristen rajojen määrittämisen jälkeen valitaan kasvihuonekaasuinventaarioon sisällytettävät päästölähteet. Tätä määrittämistä kutsutaan myös toiminnallisten rajojen asettamiseksi. Datan keräämisen tulisi painottua yhtiön merkittävimmiksi arvioituihin päästölähteisiin sekä niihin kohteisiin, joiden odotetaan tarjoavan suurimmat päästövähennysmahdollisuudet. Lisäksi raportoinnin suunnittelussa voidaan painottaa yhtiön liiketoiminnallisten tavoitteiden kannalta relevantteja kohteita. (GHG Protocol 2011, s. 27, 65)

Kantaverkkoyhtiön kannalta oleellisimpia GHG Protocolin julkaisemia ohjeistuksia ovat yrityksen kasvihuonekaasupäästöraportointia ohjaava *Corporate Standard* (GHG Protocol 2004) ja epäsuorien päästölähteiden kartoittamiseen keskittyvä *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard* (CVC3) (GHG Protocol 2011).

### 3.3.2 ISO 14064-1

ISO (the International Organization for Standardization) on kansainvälisesti laajin standardisoimisjärjestö, jonka jäsenistö koostuu 163 eri valtion edustajaorganisaatioista (ISO 2018). Järjestön kansainvälisiin standardeihin lukeutuva ISO 14064-1 *Greenhouse gases. Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals* asettaa vaatimuksia ja ohjeistaa kasvihuonekaasupäästöjen määrittämiseen ja raportointiin organisaatiotasolla. Standardisarjan kaksi muuta osaa, ISO 14064-2 ja ISO 14064-3 keskittyvät projektitason päästölaskentaan sekä tulosten verifiointiin. (ISO 14064-1 2012).

Päästöt jaetaan ISO 14064-1:ssä GHG Protocolin ohjeistuksien tapaan suoriin, ostoenergiaan liittyviin epäsuoriin ja arvoketjun muihin epäsuoriin päästöihin. Näiden lisäksi ISO määrittelee erikseen suorat *kasvihuonekaasuvähennykset* eli ne päästöt, jotka organisaation toiminnot tai omaisuus pystyvät jollakin tavalla kompensoimaan. Myös suorat biomassan poltosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt tulee raportoida. Laskennasta voidaan jättää ulkopuolelle niitä päästölähteitä, joiden arvioiminen on joko teknisesti tai taloudellisesti ylivoimaista. Aukot raportoinnissa tulee kuitenkin perustella. (ISO 14064-1 2012)

ISO 14064-1:n keskeisiä periaatteita ovat myös GHG Protocolin ohjeistuksissa sovelletut relevanssi, täydellisyys, läpinäkyvyys, jatkuvuus ja tarkkuus. Myös organisatoristen rajojen asettaminen toteutetaan standardissa GHG Protocolin tavoin joko omistussuhteiden, taloudellisen tai toiminnallisen hallinnan perusteella.

Varsinainen päästöjen kvantifiointi tapahtuu standardissa vaiheittain seuraavalla tavalla:

- a) kasvihuonekaasupäästöjen ja -nielujen identifiointi,
- b) määrittämistavan valinta,
- c) käytettävän aktiivisuusdatan valinta ja kerääminen,
- d) kasvihuonekaasupäästö- ja vähennyskerrointen valinta ja
- e) kasvihuonekaasupäästöjen ja vähennyksien laskenta. (ISO 14064-1 2012)

Laskentametodit kehoitetaan valitsemaan mahdollisimman pienien epävarmuustekijöiden, tarkkuuden, yhtenäisyyden ja toistettavuuden perusteella. Laskenta voi perustua esimerkiksi aktiivisuusdataan ja päästökertoimiin, valmiisiin malleihin tai suoriin mittauksiin. Kasvihuonekaasupäästöjen määrällisen arvioinnin jälkeen yritys määrittää mahdolliset vähennystoimenpiteet ja arvioi tulostensa luotettavuutta. Varsinaisten laskentaohjeiden lisäksi standardi sisältää suosituksia tulosten laadunvalvontaan, raportointiin ja verifiointiin liittyen. (ISO 14064-1 2012)

### 3.4 Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt

Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt ovat seurausta yhtiön toiminnasta, mutta niiden lähteenä on yhtiön ulkopuolisten tahojen omistuksessa tai hallinnassa oleva päästölähde. Epäsuorat päästöt voidaan jakaa edelleen toisen laskentatason ostoenergian tuotannosta aiheutuviin päästöihin ja kolmannen laskentatason päästöihin, joihin lukeutuvat muun muassa materiaalien ja komponenttien valmistuksen, kuljetuspalveluiden ja työmatkaliikenteen päästöt. (GHG Protocol 2011, s. 27–28) Kaikissa edellä mainituissa esimerkeissä konkreettisen päästölähteen, kuten tuotantovälineen tai ajoneuvon, omistajana ei ole raportoiva yritys. Yritys on kuitenkin hankinnoillaan tai palveluita tilaamalla aiheuttanut välillisesti päästöjen syntymisen.

Sekä ISO että GHG Protocol tunnistavat epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt ohjeistuksissaan, mutta suhtautuminen niiden laskennan laajuuteen ja välttämättömyyteen vaihtelee standardien välillä. ISO 14064-1 (2012) edellyttää ostoenergian tuotannon päästöjen sisällyttämistä raportointiin, kuitenkin velvoittamatta raportoijaa muiden epäsuorien päästöjen huomioimiseen. GHG Protocolin (2011) muiden epäsuorien päästöjen laskentaan keskittyvä standardi *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard* puolestaan vaatii myös muiden epäsuorien päästöjen järjestelmällistä tunnistamista ja raportointia.

GHG Protocol ottaa erikseen kantaa sähkönsiirron häviöihin liittyvien kasvihuonekaasupäästöjen raportoimiseen. Sen antaman ohjeistuksen mukaan sähköä siirtävä yritys sisällyttää siirtohäviöt kompensoivan sähköntuotannon päästöt raportoinnissaan toisen laskentatason päästöihin muun ostoenergian ohella. Sähkön loppukäyttäjä voi halutessaan huomioida samat häviöt kolmannella laskentatasolla, jolloin päällekkäistä raportointia ei tapahdu. (GHG Protocol 2004, s. 27–28)

Arvoketjun muiden epäsuorien eli kolmannen laskentatason päästöjen kokonaisvaltainen auditointityö edellyttää runsaasti resursseja, mutta se nähdään tästä huolimatta tarkoituksenmukaisena: merkittävä osa yrityksen hiilijalanjäljestä muodostuu toiminnan kolmannen laskentatason päästöistä, joiden raportoinnin laiminlyöminen voi johtaa huomattavaan kokonaispäästömäärien aliarvioimiseen (Andrew & Cortese 2011; GHG Protocol 2011). 2000-luvun aikana kolmannen laskentatason kasihuonekaasupäästöjä raportoivien yritysten määrä on kasvanut tasaisesti, mikä kertoo myös lisääntyneestä paineesta raportoinnin kehittämiseksi (Blanco et al. 2016). Tässä alaluvussa sovelletaan GHG Protocolin (2011) ohjeistusta *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard* muiden epäsuorien päästöjen esittämisessä, sillä se on laaja-alaisin ja myös Fingridillä käytössä oleva proseduuri määrittästyön tueksi.

Yrityksen muut eli kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt voidaan jakaa kahdella arvoketjun alkupään (engl. upstream) ja sen loppupään (engl. downstream) päästöihin. Arvoketjun alussa huomioidaan ostetuista raaka-aineista, laitteista, palveluista ja polttoaineista, yrityksen työntekijöiden matkustamisesta sekä syntyvän jätteen käsittelystä aiheutuneet päästöt. Arvoketjun loppupään päästöihin luetaan puolestaan yritysten valmistamien tuotteiden tai tarjoamien palveluiden käytön ja kuljetusten, myytyjen tuotteiden käytön jälkeisen hävittämisen, edellisiin liittyvien leasing-kohteiden, yrityksen harjoittaman franchising-toiminnan sekä investointien päästöt (taulukko 2).

**Taulukko 2.** Kolmannen laskentatason päästökategoriat (GHG Protocol 2011, s. 35–37).

Toiminta-alue	Päästökategoria
Tuotanto	1. Ostetut palvelut ja tuotteet
	2. Tuotantohyödykkeet
	3. Polttoaineisiin ja energiantuotantoon liittyvät päästöt, joita ei ole huomioitu muilla laskentatasoilla
	4. Tuotantohyödykkeiden ja materiaalien kuljetukset ja jakelu
	5. Tuotannossa syntynyt jäte
	6. Liikematkustaminen
	7. Työmatkat
	8. Tuotannon leasing-kohteet
Käyttö	9. Valmiiden tuotteiden kuljetukset ja jakelu
	10. Myytyjen tuotteiden prosessointi
	11. Myytyjen tuotteiden käyttö
	12. Myytyjen tuotteiden hävittäminen
	13. Valmiin tuotteen myyntiin, jakeluun tai käyttöön liittyvät leasing-kohteet
	14. Franchising
	15. Investoinnit



Yhden päästölähteen päästöt sisällytetään yrityksessä yhteen laskentatasoon kerrallaan. Jollekin toiselle organisaatiolle samat päästöt voivat kuitenkin lukeutua muille laskentatasolle, ja parhaimmillaan useampi yritys voi laskea samat päästöt yhtäaikaaisesti kolmannelle laskentatasolle kukin omassa raportoinnissaan. (GHG Protocol 2011, s. 27–28) Esimerkiksi yrityksen ostamien kuljetuspalveluiden päästöt voidaan laskea samanaikaisesti sekä tuotteen lähettäjän että vastaanottajan kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöiksi. Niin kutsutun kaksoislaskennan mahdollisuus aiheuttaa sen, että epäsuoria päästöjä ei voida raportoida alueellisesti GHG Protocolin ohjeistuksella.

Tiettyjen päästölähteiden kohdalla raportoitavia kasvihuonekaasupäästöjä on voinut syntyä myös ennen varsinaista raportointivuotta. Esimerkkejä tällaisista tilanteista ovat muun muassa raportointivuonna hankittujen tuotantohyödykkeiden tai polttoaineiden valmistuksen päästöt. Vastaavasti osa raportoiduista päästöistä, kuten investointien ja jätteenkäsittelyn prosessien päästöt, aiheutuvat konkreettisesti vasta raportointia seuraavina vuosina. (GHG Protocol 2011, s. 33)

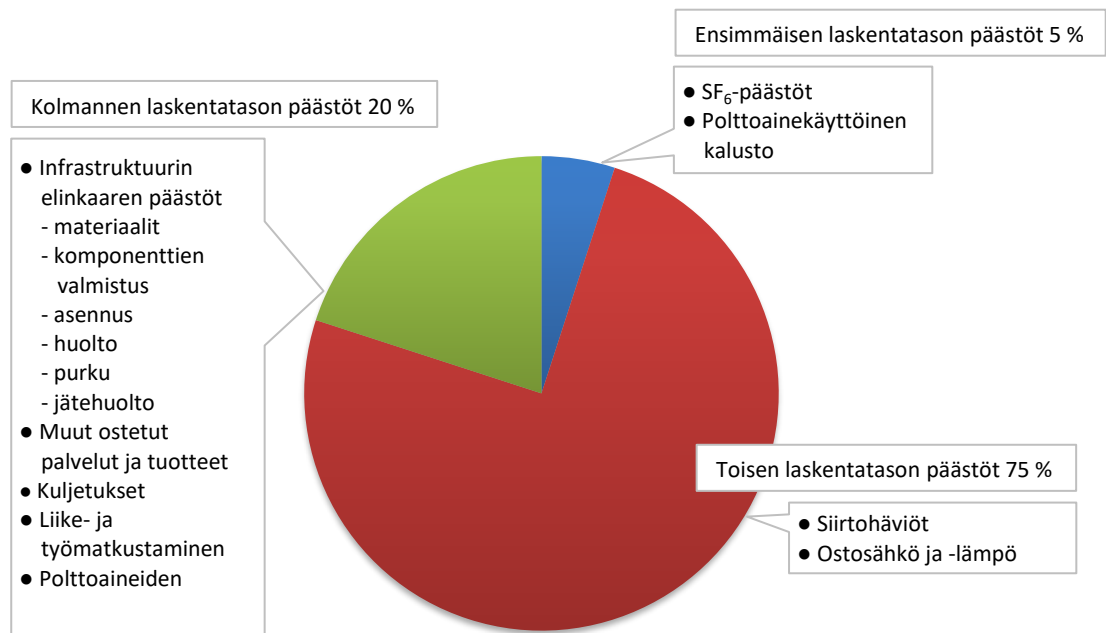
GHG Protocolin standardeissa noteerataan pitkien arvoketjujen kasvihuonekaasupäästöjen laskennalle aiheuttamat haasteet. Kolmannen laskentatason epäsuorien päästöjen raportointivaatimuksista huolimatta ohjeistukset kehottavat pyrkimään päästöarvioissa pikemminkin *edustavaan* kuin *tyhjentävään* kuvaan arvoketjusta kokonaisuutena. Aina tunnistettujenkaan lähteiden tarkka kasvihuonekaasupäästömäärien laskenta ei ole mahdollista rajoittavien tekijöiden, kuten puuttuvien lähtötietojen, takia. Myös päästölähteen vähäistä vaikutusta yrityksen kokonaispäästömäärään voidaan käyttää syynä sen huomiotta jättämiselle. Jos yritys jättää raportoimatta joitakin kolmannen laskentatason päästöjä, perustelut tälle on sisällytettävä raportointiin. (GHG Protocol 2011, s. 33) Pohjadataan keruuta voidaan yksinkertaistaa priorisoimalla esimerkiksi niitä kohteita, joiden kasvihuonekaasupäästöjen oletetaan olevan määrältään merkittäviä, joiden kohdalla yrityksen päästövähennyspotentiaali on suurimmillaan tai jotka ovat olennaisimpia yrityksen liiketoiminnallisten tavoitteiden kannalta.

## 4. KANTAVERKKOYHTIÖN HIILIJALANJÄLKI

Kantaverkkoyhtiön hiilijalanjälki kattaa toiminnan suorat ja epäsuorat päästöt. Päästöjen jakautuminen eri laskentatasoille riippuu useasta tekijästä, joista merkittäviä ovat muun muassa yhtiön omistaman polttoainekäyttöisen kaluston määrä ja alihankintoina ostettujen palveluiden osuus toiminnasta. Myös käytetyt arviointimenetelmät ja laskennan raja-  
aus vaikuttavat tuloksiin selkeästi (GHG Protocol 2011). Kantaverkkoyhtiön kohdalla myyty palvelu on sähkön siirto, johon liittyvän infrastruktuurin käytöstä aiheutuneet päästöt allokoidaan ensimmäisen ja toisen laskentatason päästöihin. Kolmannen laskentatason päästöt muodostuvat ostetuista palveluista, komponenttien ja raaka-aineiden tuotannosta sekä muista yhtiön toiminnoista, joissa päästölähde ei ole sen omistuksessa.

Suuri osa eurooppalaisista kantaverkkoyhtiöistä raportoi hiilijalanjälkeään vähintäänkin nimellisesti, mutta raportoinnin laajuudessa ja tarkkuudessa on huomattavia yhtiökohtaisia eroja. Toiminnan ensimmäisen sekä toisen laskentatason päästöjä on arvioitu kolmannen laskentatasoon verrattuna paljon useammin, vaikkakin raportoinnin taso vaihtelee myös näiltä osin. Ensimmäistä ja toista laskentatasoa raportoivat eksaktisti esimerkiksi Hollannin kantaverkkoyhtiö TenneT, Portugalin REN sekä Italian Terna (TenneT 2018; REN 2018; Terna 2018), joiden vuosikertomukset tai niiden liitteet sisältävät kattavaa erittelyä muun muassa yhtiöiden sähkönkulutukseen liittyvistä päästöistä. Kokonaisvalta-  
taisimmin omaa hiilijalanjälkeään julkisesti luettavissa olevassa materiaalissa arvioivat belgialainen Elia ja espanjalainen Red Eléctrica de España (REE), jotka ovat sisällyttäneet raportointiinsa kolmeen laskentatasoon useita eri päästölähteitä (Elia 2018; REE 2018). Sekä Elian että REEn päästöraportoinnin sovellusala vastaa laajuudeltaan GHG Protocolin (2011) CVC3-standardin vaatimuksia. Muualla Euroopassa muita epäsuoria päästöjä on arvioitu lähinnä liikematkustamisen osalta (kts. esim. REN 2018; Statnett 2018; Fingrid 2018j).

Kuvassa 7 on eritelty kantaverkkoyhtiön hiilijalanjäljen muodostumista laskentatasoitain. Kuvassa esitetyt suhdeluvut perustuvat REEn (2018) ja Elian (2018) toteuttamiin hiilijalanjälkiselvityksiin. Huomioitavaa on, ettei kumpikaan kantaverkkoyhtiö omista merkittävää varavoimakapasiteettia. Näin ollen luvut eivät ole yleistettävissä Suomen kantaverkkoyhtiölle. Seuraavissa alaluvuissa on esitelty lyhyesti keskeisimpiä kantaverkkoyhtiön päästölähteitä laskentatasoille jaettuna. Laskentatasoille erittelyn pohjalla on oletus siitä, että yhtiö ei toteuta kantaverkon elinkaareen liittyviä toimintoja omistamallaan välineistöllä.



*Kuva 7. Kantaverkkoyhtiön hiilijalanjälki.*

#### 4.1 Suorat eli ensimmäisen laskentatason päästöt

Suorien eli ensimmäisen laskentatason kasvihuonekaasupäästöjen osuus kantaverkkoyhtiön hiilijalanjäljestä riippuu pitkälti siitä, onko yrityksen omistuksessa autokalustoa tai muita polttoainekäyttöisiä laitteita. Suoriin päästöihin sisällytetään myös yhtiön omistaman varavoimakapasiteetin käytön tai sen hallinnoiman muun energiantuotannon päästöt. Jos yhtiön rakennuttamistoimintoja ei ole ulkoistettu palveluntarjoajille, myös rakentamisen yhteydessä käytettyjen työkalujen päästöt luetaan yhtiön suoriksi kasvihuonekaasupäästöiksi.

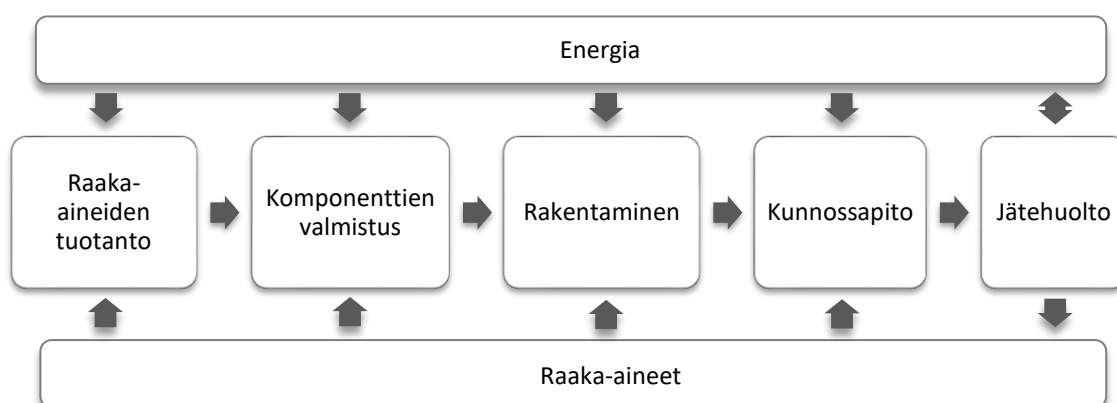
Polttoaineiden käytön ohella toinen kantaverkkoyhtiölle tyypillinen suorien päästöjen aiheuttaja on GIS-sähköasemien eristeenä käytetty SF<sub>6</sub>. SF<sub>6</sub>-vuotojen ilmastomuutosvaikutukset ovat vuotomääriin suhteutettuna huomattava kaasun korkean GWP-kertoimen (kts. alaluku 3.1 *Lämmityspotentiaali GWP*) vuoksi. SF<sub>6</sub>-päästöjä syntyy tahattomasti käytön aikana sekä asemien rakentamisen, käyttöönoton, huollon ja purun yhteydessä. Sähköasemien kokonaishiilijalanjäljestä SF<sub>6</sub>-päästöt eivät kuitenkaan muodosta kovin merkittävää osaa matalan vuototason ansiosta. (Wang et al. 2012) Globaalistikin SF<sub>6</sub>-päästöt vastaavat vain noin 0,3 %:a yhteenlasketusta kasvihuonekaasujen ilmastomuutosvaikutuksesta ja määrä on edelleen laskussa (Beroual & Haddad 2017). Toisaalta kaasuero pienentää sähköasemalaitteiston energiankulutusta, mikä puolestaan alentaa epäsuorien, toiselle laskentatasolle allokoitavien päästöjen määrää (Mazzanti et al. 2016).

## 4.2 Epäsuorat eli toisen laskentatason päästöt

Suurin osa sähkönsiirron ilmastokuormasta muodostuu kantaverkon siirtohäviöistä, jotka ovat huomattavan suuria pitkillä voimajohdoilla ja suurilla siirtovolyymeilla. Siirtohäviöistä aiheutuviksi päästöjä ovat niitä kompensoivan energiantuotannon päästöt, jolloin ne luetaan epäsuoriksi, toisen laskentatason päästöiksi. Esimerkiksi vuonna 2015 siirtohäviöihin arvioitiin kuluvan 0,89–2,77 % eurooppalaisissa valtioissa siirretystä sähköstä (CEER 2017, s. 7). Häviöt aiheutuvat pääasiassa virtalämpöhäviöistä ja tietyissä sääolosuhteissa johtimien pinnalla syntyvistä koronahäviöistä (Fingrid 2018a). Lisäksi siirtohäviöihin luetaan sähköasemien muuntohäviöt, jotka vastaavat suurinta osaa sähköasemien hiilijalanjäljestä (Jorge & Hertwich 2012b). Muuta ostoenergiaa yhtiön toiminnoissa kuluu lämpö- ja sähköenergiana toimitiloissa sekä sähköasemilla.

## 4.3 Muut epäsuorat eli kolmannen laskentatason päästöt

Merkittävä osan kantaverkon elinkaaren muista epäsuorista eli kolmannen laskentatason päästöistä liittyy kantaverkon infrastruktuuriin (Gargiulo et al. 2017; Jorge & Hertwich 2013). Kuvassa 8 on esitetty verkon infrastruktuurin elinkaari ja sen vaiheisiin liittyvät päästölähteet.



**Kuva 8.** *Kantaverkon elinkaari.*

Voimajohto- ja sähköasemakomponentit vaativat kantaverkkoinfrastruktuurin laajuuden takia paljon raaka-aineita, joiden louhinta tai muu hankinta tuottavat päästöjä jo ennen varsinaisia komponenttien valmistusprosesseja. Pylväiden teräs ja johdinten alumiini ovat hiilijalanjäljen kannalta verkon merkittävimmät raaka-aineet niiden suuren volyymin sekä energiantensiivisten valmistusprosessien takia (Harrison et al. 2010). Teräksen tuotannon päästöt aiheutuvat suurimmaksi osaksi raakaraudan valmistuksesta, kun rautamalmi pelkistetään hiilellä ja koksilla. Uusioteräksen tuotannossa hiiltä ja koksia ei tarvita, jolloin päästöt ovat huomattavasti rautamalmipohjaisen teräksen valmistusta matalammat. (Pardo et al. 2012). Alumiinin valmistuksessa keskeisin päästölähde on primäärimateriaalin energiantensiivinen tuotanto bauksiitista, joka voidaan jälleen ohittaa käyttämällä alumiiniromua prosessin raaka-aineena (Zhang et al. 2016). Lisäksi pylväiden

teräs galvanoidaan eli sinkitetään kuumasinkitysmenetelmällä korroosion ehkäisemiseksi (Elovaara & Haarla 2011, s. 265). Sinkin primäärituotanto ja galvanointi ovat molemmat päästöintensiivisiä prosesseja, joiden vaikutus näkyy komponenttien hiilijalanjäljissä (Jorge & Hertwich 2014).

Sähköasemien laitteiden materiaalit tuottavat verkon muiden komponenttien tapaan epäsuoria kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöjä. Hiilijalanjäljen kannalta keskeisin yksittäinen laiteluokka ovat tehonmuuntajat (Harrison et al. 2010). Myös laitteiden kohdalla raaka-aineiden tuotanto muodostaa suurimman osan valmistusvaiheen päästöistä (ABB 2003b; ABB 2007a). Useiden satojen tonnien painoiset laitteet sisältävät merkittäviä määriä metalleja, kuten sähköterästä, kuparia ja alumiinia (ABB 2007a; Hegedić et al. 2016). Myös muuntajien muuntajaöljyn tuotannon päästöt lukeutuvat sähköasemalaitteiden hiilijalanjälkeen, vaikkakin niiden painoarvo suhteutettuna kokonaispäästöihin on pieni (Harrison et al. 2010).

Komponenttien ja laitteiden kokoamisvaiheiden päästöillä ei ole suurta vaikutusta niiden elinkaaren aikaiseen ilmastokuormaan (Jorge et al. 2012a; Jorge et al. 2012b). Keskeisin valmistukseen, ei suoraan materiaalien hankintaan ja tuotantoon liittyvä, päästölähde on metalliosien muokkaus (Harrison 2010). Tästä esimerkkinä on johdinten kylmäveto, jossa valettu metallitanko venytetään haluttuun läpimittaan kylmävetomenetelmällä. Näin valmistetut langat punotaan johtimiksi. (Karabay et al. 2018) Pylväät kootaan osista asennuspaikalla. Muiden komponenttien kokoamisen päästöt riippuvat tehtaissa käytetyn energian määrästä ja tuotantomuodosta. Lisäksi GIS-asemien tuotannon yhteydessä syntyy pieniä määriä SF<sub>6</sub>-päästöjä (Jorge et al. 2012b).

Rakentaminen ja sitä edeltävät toimenpiteet, kuten johtaukean raivaaminen, eivät ole kovin merkittäviä tekijöitä kantaverkon kokonaishiilijalanjäljen muodostumisen kannalta (Harrison et al. 2010; Kjeld et al. 2018; Jorge et al. 2012a). Rakentamisen yhteydessä käytetään runsaasti polttoainekäyttöistä välineistöä, josta tämän elinkaaren vaiheen päästöt pääasiassa muodostuvat (Bumby et al. 2010). Infrastruktuurin käytön aikana kolmannen laskentatason päästöt liittyvät verkon kunnossapitotoimenpiteisiin ja esimerkiksi ympäröivän kasvuston käsittelyyn. Sääolosuhteiden tai kulumisen seurauksena rikkoutuneita komponentteja voidaan joutua korvaamaan uusilla verkon käyttövaiheessa, mutta varosien tuotannon ilmastomuutosvaikutukset jäävät yleensä alle kymmenekseen koko infrastruktuurin komponenttien hiilijalanjäljestä (Harrison et al. 2010; Hrólfsdóttir 2014). Sähköasemien kunnossapito on voimajohtoja pienimuotoisempaa. Merkittävimpiä sähköasemilla toteutettuja kunnossapitotoimenpiteitä ovat suurilla työkoneilla suoritettavat tehtävät, kuten katkaisijoiden ja erottimien huollot. (J. Tammi, haastattelu 30.5.2018).

Verkon rakentamisen ja puron yhteydessä syntyneen jätteen aiheuttamaan ilmastokuormaan vaikuttaa eniten sen käsittelytapa. Komponenttien materiaaleja kierrättämällä saatu ilmastohyöty on merkittävä (Jorge et al. 2012; Jorge & Hertwich 2014). Metallit ovat luontaisesti täysin kierrätettävissä, ja maailmanlaajuisesti tuotetusta alumiinista ja teräksestä valtaosa hyödynnetään ensisijaisen käytön jälkeen uusiomateriaalina (UNEP 2011).

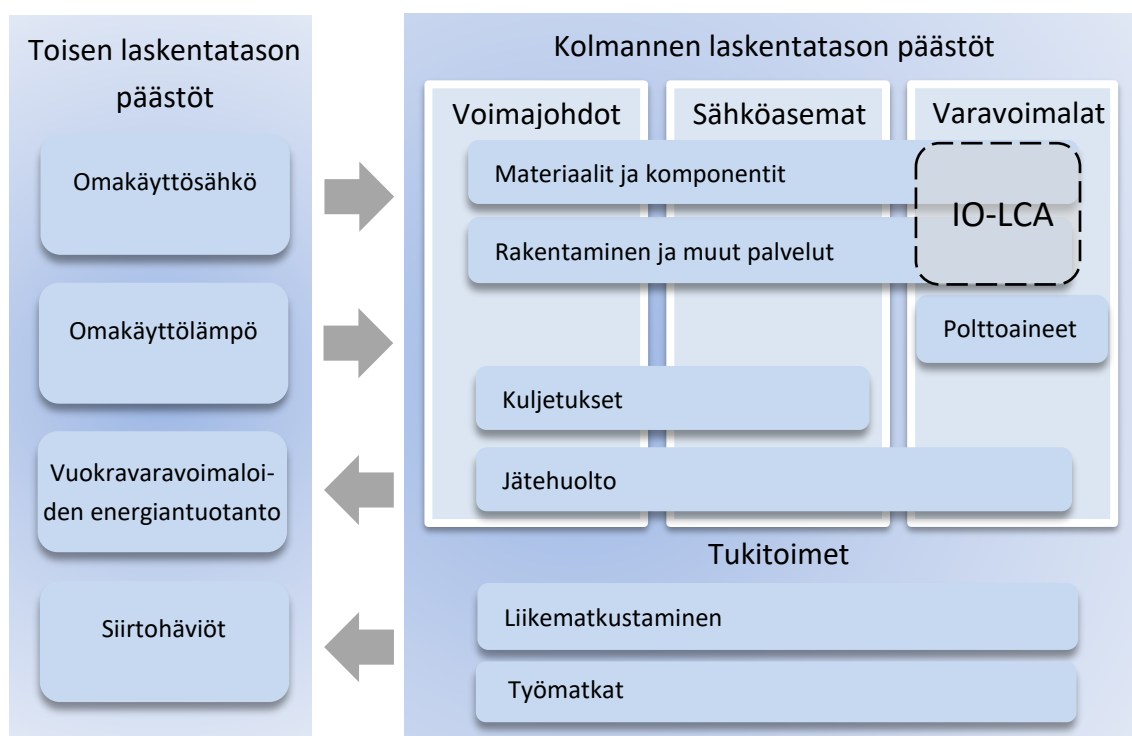
Osa materiaalista pääty kaatopaikalle, jossa jätteestä muodostuu kaatopaikkakaasua. Muodostuneen kaatopaikkakaasun tilavuus on verrannollinen jätteen sisältämän orgaanisesti hajoavan hiilen määrään. (Tuhkanen 2002, s. 12) Muuntajaöljy, pylväiden kyllästetty puu sekä muu vaaralliseksi luokiteltu jäte käsitellään erityistekniikoilla, kuten korkealämpötilapoltolla, jonka hiilijalanjälki on huomattava suhteessa muihin käsittelymenetelmiin (Dahlbo et al. 2011). Jätehuollon kasvihuonekaasupäästökertymää lisäävät kuljetukset, jotka saattavat kasvaa pitkiksi syrjäisempien työmaiden jätettä noudettaessa.

Verkon materiaaleja tai valmiita komponentteja kuljetetaan pitkiä matkoja tuotantolaitoksilta käyttökohteeseen, jolloin myös liikennevälineiden päästöt on huomioitava päästölaskennassa. Esimerkiksi pylväiden ja johdinten merkittävän raaka-aineen teräksen tuontiosuudesta EU:ssa noin 60 % on peräisin Aasiasta (EUROFER 2018, s. 38), jonne matka Euroopan pohjoisosista mitataan tuhansissa kilometreissä. Matkan pituuden lisäksi muita kuljetusten hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä ovat itse kuljetusväline, sen täyttöaste ja kuorman massa. Mannerten väliset matkat rahti kuljetetaan yleisimmin meriteitse, mikä on maantieliikennettä vähäpäästöisempi vaihtoehto (IMO 2015).

Infrastruktuurin rakentamisen ja ylläpidon lisäksi kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöjä syntyy henkilöstön toiminnasta, kuten liike- ja työmatkailusta sekä toimiloissa tuotetusta jätteestä. Myös yhtiön omistaman laitteiston tai kulkuneuvojen käyttämien polttoaineiden tuotannossa syntyy päästöjä, jotka luetaan kolmannelle laskentatasolle.

## 5. TUTKIMUSMETODIT JA PÄÄSTÖLASKENNAN LÄHTÖTIEDOT

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa käytetyt metodit sekä päästölaskennan lähtötiedot, joiden perusteella vuonna 2017 Fingridin toiminnasta aiheutuneita toisen ja kolmannen laskentatason päästöjä on määritetty. Toteutettu hiilijalanjälkianalyysi kattaa yrityksen toiminnan kannalta relevantteja päästökategorioita kuvan 9 mukaisesti. Toisen laskentatason päästöistä on huomioitu omakäyttöenergian ja siirtohäviöitä kompensoivan energiantuotannon lisäksi vuokravaravoimalaitoksissa tuotetun energian päästöt. Kolmannella laskentatasolla käyttöomaisuuden eli infrastruktuurin materiaalien ja komponenttien tuotannon päästöt on laskettu erikseen voimajohdoille, sähköasemille sekä varavoimalaitoksille, ja jaettu laskennan kohteen perusteella omiin alalukuihinsa. Varavoimalaitoksia tarkasteltiin panos-tuotosperusteisesti (IO-LCA), jolloin niihin liitettävät materiaalit, komponentit ja palvelut käsiteltiin yhdessä niihin investoituja summia lähtötietona käyttäen. Muiden päästökategorioiden laskenta on rajattu kuvan mukaisesti ja esitetty tekstissä kategoriakohtaisesti. Tukitoimet, kuten liike- ja työmatkustaminen, voidaan liittää yhtiön kaikkiin toiminta-alueisiin. Työssä ei ole laskettu biogeenisiä hiilidioksidipäästöjä tai raivausten myötä poistuneen metsämaan ilmastovaikutuksia GHG Protocolin (2011) ohjeistuksen mukaisesti. Myöskään materiaalien kierrättämisen tai muun toiminnan myötä vältettyjä päästöjä ei ole raportoitu.



**Kuva 9.** Tutkimuksen rajaus.

Tarkasteluvuoden aikana valmistuneiden kohteiden tai käyttöönotettujen komponenttien hiilijalanjäljessä on huomioitu mahdollisimman laajasti niiden elinkaaren vaiheiden, kuten valmistuksen, kuljetusten, asennuksen, kunnossapidon ja jätehuollon, päästöjä. Vasta vuoden 2017 jälkeen valmistuneiden projektien hiilijalanjäljen arviointi allokoitiin rakentamisen osalta tuleville vuosille. Rakentamisprojektien kesto on voimajohdoille keskimäärin 5–8 vuotta ja sähköasemille 1–2 vuotta, mikä asetti haasteita tutkimusrajausten tekemiselle. Työssä on tehty laskemisen mahdollistamiseksi tiettyjä rajoituksia, joita on koottu laskentamenetelmiä kuvaaviin alalukuihin. Komponentin kokoamisen tai muun prosessoinnin päästöt on jätetty erikseen ilmoitettuja poikkeuksia lukuun ottamatta laskennan ulkopuolelle, sillä niiden merkitys on arvioitu pieneksi kokonaisuuteen suhteutettuna. Organisatorisesti rajausta on tehty toiminnallisen hallinnan perusteella: päästöt on laskettu mukaan Fingridin hiilijalanjälkeen, kun yhtiöllä on ollut hyödykkeeseen täysi operatiivinen hallinta.

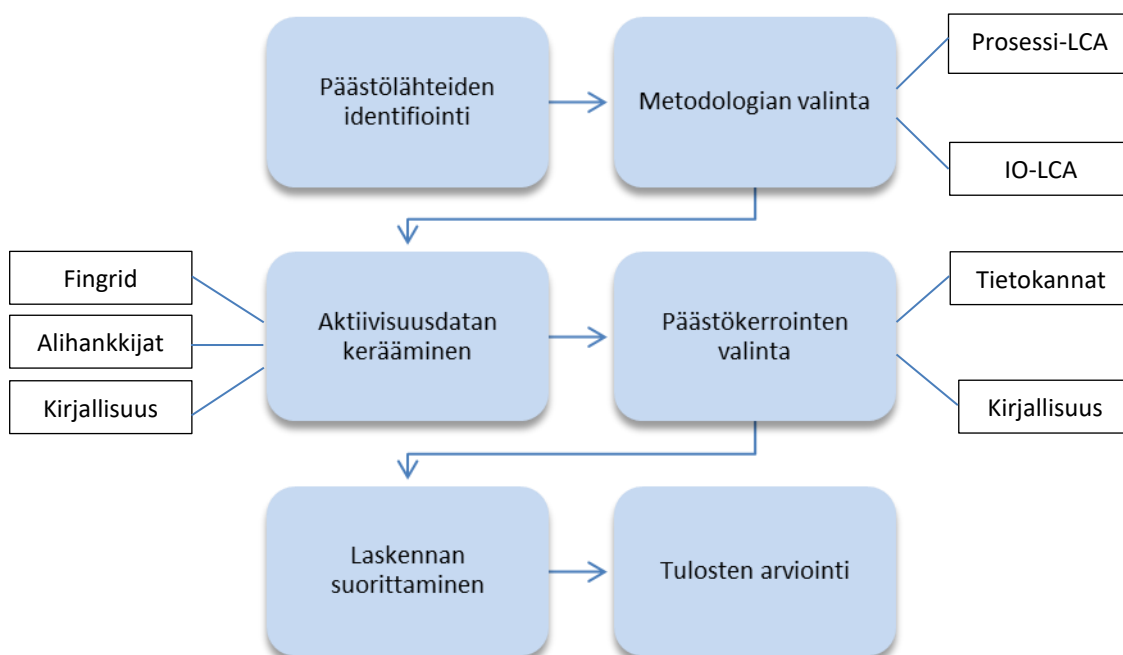
Hiilijalanjälkianalyysi on toteutettu pääasiassa prosessidataa hyödyntäen, mutta sen puutteita on korvattu panos-tuotosmallilla varavoimailaitosten infrastruktuurin yhteydessä. Lähtötiedot sisältävät sekä primääri- että sekundääridataa päästölähteestä riippuen, ja myös kirjallisuudesta löytyvien elinkaarianalyysien tuloksia on hyödynnetty sellaisinaan niille kohteille, joille soveltaminen on nähty tarkoituksenmukaisena. Jos lähdettä ei ole erikseen mainittu, tieto on peräisin Fingridin sisäisestä dokumentoinnista tai yhtiön omaisuudenhallintajärjestelmästä ajetuista raporteista (Fingrid 2018d).

Kaikki käytetyt päästökertoimet on koottu liitteeseen A *Päästökertoimet* ja tärkeimmät niistä on esitelty tekstissä valintaperusteluineen. Kertoimia koottiin tutkimuskirjallisuudesta sekä Ecoinvent-tietokannasta (2016). Prosessidata on sijoitettu päästölaskentaa varten kaavaan 2 (kts. alaluku 3.2 *Laskentamenetelmät*). Panos-tuotosdata on kerätty Carnegie Mellon University Green Design Institutin (2018) US EPA's USEEIO model -tietokannasta. Sen käyttöä varten kaikki rahapanokset on muunnettu euroista dollareiksi kertomalla ne vuoden 2017 keskimääräisellä valuuttakurssilla 1,1297 (Verohallinto 2017). Rahan nykyarvo on muutettu kuluttajahintojen muutosta kuvaavan kuluttajahintaindeksiin (engl. consumer price index, CPI) avulla vastaamaan vuoden 2002 hintatietoja. Tarkemmat tiedot CPI:n käytöstä työssä on koottu liitteeseen B *CPI-kuluttajahintaindeksi*.

Kuvassa 10 on esitetty vuokaavio päästölaskennan vaiheista. Kuvattu prosessi mukailee ISO 14064-1:n suositusta päästölaskennan toteuttamisproseduurista kasvihuonekaasuselvityksessä. Ennen laskennan aloittamista tehty tutkimusrajaus edellytti mahdollisten päästölähteiden identifiointia ja niiden merkityksen alustavaa arviointia kirjallisuuden perusteella. Metodologia valittiin päästölähteen luonteen sekä siitä saatavilla olevien lähtötietojen perusteella. Aktiivisuusdatan keruu ja soveltaminen oli työn laajin ja vaativin vaihe, johon kului merkittävin osuus työhön käytössä olleista resursseista. Myös soveltuvien päästökerrointen valinta edellytti laajaa taustatyötä, sillä kerrointen välinen hajonta oli huomattavaa. Taustatyön jälkeen suoritettu laskenta oli itsessään suoraviivainen prosessi, jonka tulokset koottiin ennalta määritettyjen päästökategorioiden alle.



Laskentaa seurasi tulosten kriittinen arviointi ja vertailu saatavilla olevaan kirjallisuuteen, minkä perusteella varsinaiset johtopäätökset ja jatkotoimenpidesuositukset oli mahdollista tehdä.



**Kuva 10.** Päästölaskennan vaiheet (mukaillen ISO 14064-1 2012, s. 8).

## 5.1 Omakäyttösähkö

Fingridin omakäyttösähkön kulutus on laskettu vuonna 2017 ostosähköksi tiliöityjen sähkölaskujen summan perusteella. Yhteensä ostosähköön käytettiin vuoden aikana verollisena noin 740 290 €, joka muunnettiin megawattitunneiksi käyttäen Tilastokeskuksen (2018) vuodelle 2017 arvioimaa sähkön keskimääräistä yksikköhintaa. Kuukausien keskiarvo sisältäen sähkön siirtomaksut ja verot oli Tilastokeskuksen (2018) mukaan 65,98 €/MWh, jolloin Fingridin omakäyttösähkön määräksi saatiin noin 11 220 MWh.

Summa on suuntaa antava arvio Fingridin sähkönkulutuksen määrästä tarkempien lähtötietojen puuttuessa. Osa toimitiloissa käytetystä sähköstä maksetaan kiinteänä summana vuokran yhteydessä, jolloin ne eivät ole mukana laskennassa. Sähkön hinta ja siirtomaksut vaihtelevat kuukausien sekä laskutettavien kohteiden välillä, mutta erittelevän tiliöinnin puuttuessa edellä esitetty lähestymistapa on nähty tarkkuudeltaan riittävänä.

Toiselle laskentatasolle lukeutuvan vuokravaravoimaitoksissa tuotetun energian päästöt on laskettu käytettyjen päästökauppa-oikeuksien perusteella Fingridin henkilöstön toimesta (Fingrid 2018j).

Päästökertoimena sähkönkulutukselle käytettiin arvoa 181 g CO<sub>2</sub>/kWh (Tilastokeskus 2016, Motivan 2017 mukaan).

## 5.2 Omakäyttölämpö

Lämpöenergian kulutusta toimitiloille on arvioitu RILin (2012, s. 18) asiantuntija-arvion mukaan neliöperusteisesti. Arvio sisältää tilojen, ilmanvaihdon sekä käyttöveden lämmitykseen kuluvan energian. Etelä-Suomessa sijaitsevalle toimitilalle on käytetty arvoa 40 kWh/m<sup>2</sup>/a, Keski-Suomessa 46 kWh/m<sup>2</sup>/a ja Pohjois-Suomessa 54 kWh/m<sup>2</sup>/a RILin (2012, s. 19) sijaintiperusteisten kulutuseroarvioiden mukaan. Kokonaislämpö ja lähtöarvot on esitetty taulukossa 3. Kokonaisuudessaan 9 426 toimistoneliön lämmitykseen lämpöenergiaa laskettiin kuluvan 364 MWh/a.

**Taulukko 3.** *Lämpöenergian kulutus Fingridin toimitiloissa.*

Vyöhyke	Lämmön kulutus (kWh/m <sup>2</sup> /a)	Kiinteistön sijainti	Pinta-ala (m <sup>2</sup> )	Lämmön kulutus yhteensä (MWh/a)
Etelä-Suomi	40	Helsinki	7 323	293
		Hämeenlinna	950	38
Keski-Suomi	46	Petäjävesi	1 500	Sähkölämmitys
		Varkaus	292	13
Pohjois-Suomi	54	Oulu	311	17
		Rovaniemi	55	3
Yhteensä			9 426	364

Varavoimaloiden kaukolämmönkulutus on laskettu Fingridin toimesta vuosikertomukseen 2017, jossa ilmoitettu lukema on 631 MWh (Fingrid 2018j). Sähköasemien kaukolämmönkulutusta ei laskettu neliötietojen puuttumisen vuoksi. Päästölaskennan lähtötietona lämmönkulutukselle käytettiin siis toimistojen ja varavoimaloiden yhteenlaskettua kulutusta 995 MWh.

Päästökertoimena kaukolämmölle 176 g CO<sub>2</sub>/kWh (Energiateollisuus ry 2016, Motivan 2017 mukaan).

## 5.3 Siirtohäviöt

Siirtohäviöiden määrä oli Fingridin oman raportoinnin mukaan vuonna 2017 yhteensä 1 223 GWh eli 4 402 800 GJ (Fingrid 2018j). Luku on Fingridin sähkömarkkinoilta ostaman häviösähkön määrä, joka sisältää mitatun häviön lisäksi osuuksia esimerkiksi Fingridille allokoitujen rajajohtojen häviöistä sekä sähköasemien kulutuksesta.

## 5.4 Voimajohtojen materiaalit ja komponentit

Vuoden 2017 aikana Fingridillä oli käynnissä yhteensä 16 voimajohtohanketta tai johtojärjestelyä. Voimajohtohankinnoista hiilijalanjälkilaskentaan on sisällytetty johdinten,

pylväiden, perustusten sekä eristinten materiaalien ja tiettyjen valmistusprosessien päästöt. Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty pylväiden paalutukset lähtödatan heikon saatavuuden sekä maadoituskaapelit ja johdinvarusteet niiden vähäisen merkityksen takia.

## Johtimet

Taulukossa 4 on esitetty vuonna 2017 käyttöönotetut johdinkilometrit sekä materiaalmäärät johdintyypeittäin. OPGW-johtoa on mallinnettu ACSR-johtona, jonka sisällä kulkee valokuitu. Taulukossa 4 esitetyt johdintyyppien materiaalmäärät on laskettu voima-johtovalmistaja Prysmianin (2013) tuotetietojen sekä ilmajohtostandardin (EN 50182 2001) perusteella. Yhteensä johtimet sisälsivät alumiinia noin 613 t, alumiiniseosta 33 t ja terästä 243 t. Valokuitua vuonna 2017 käyttöönotetuissa johtimissa arvioitiin olevan OPGW-johdon pituudelta eli 20,8 km.

**Taulukko 4.** *Käyttöönotettujen johdinten materiaalit.*

Johdintyyppi	Pituus (km)	Alumiini		Teräs	
		Massa (kg/km)	Massa yhteensä (kg)	Massa (kg/km)	Massa yhteensä (kg)
ACSR 300–449 mm <sup>2</sup>	623,7	842	525 119	309	192 710
AACSR & OPGW	111,5	293*	32 673*	193	21 522
ACSR 67–149 mm <sup>2</sup>	54,0	234	12 637	110	5 940
ACSR 450–650 mm <sup>2</sup>	39,4	1 562	61 596	561	22 122
AAC	4,7	2 956,5	14 030	-	-
Teräsjohdin	0,8	-	-	408	318
Yhteensä	834,1	646 100		242 600	

\* Alumiiniseos

AACSR-johtojen alumiiniseos on magnesium-pii-seosteista alumiinia (AlMgSi) (Elovaara & Haarla 2011, s. 278), mutta tässä työssä se on korvattu Ecoinvent-tietokannan (2016) AlMg<sub>3</sub>-seoksella AlMgSi-seoksen elinkaaritietojen puuttumisen vuoksi.

Johdinten valmistusprosessia on mallinnettu laskemalla materiaalien elinkaaripäästöjen lisäksi kylmävetomenetelmän päästöt kilogrammaa kohden. Ecoinvent-tietokannan (2016) päästökerrointa teräksen kylmävedolle on sovellettu myös alumiinille ja alumiini-seokselle, sillä prosessien arvioidaan olevan materiaaleille hyvin samankaltaiset (Jorge & Hertwich 2014).

## Eristimet

Fingridin vuonna 2017 käyttöönottamat eristimet on valmistettu lasista tai komposiitimuovista. Eristimet on koottu ketjuiksi sinkitystä teräksestä valmistetuilla eristinvarusteilla. Taulukoissa 5 ja 6 on ilmoitettu arviot vuonna 2017 käyttöönotettujen eristinten materiaalmääristä. Alla esitetyt laskelmat perustuvat joko pylväskohtaisiin tietoihin tai niiden puuttuessa projektikohtaisiin oletuksiin eristinketjuista. Laskuissa on huomioitu

eristinmateriaali sekä eristinketjujen määrä ja tyyppi. Lasieristimen rakenne on mallinnettu Fingridin omien piirustusten perusteella. Komposiittieristimen rakenne- ja materiaalitiedot on saatu suoraan valmistajalta (G. Ludányi, sähköposti 11.7.2018). Yhteensä eristimiin kului terästä noin 100 t, silikonista 8 t, komposiittia 4 t ja lasia 66 t.

**Taulukko 5.** Käyttöön otettujen komposiittieristimien materiaalit.

Komposiittieristin	Teräs (kg)	Silikoni (kg)	Komposiitti (kg)
Ketjut	65 256		
Eristin	4 099	8 135	4 092
Yhteensä	69 355	8 135	4 092

**Taulukko 6.** Käyttöön otettujen lasieristimien materiaalit.

Lasieristin	Teräs (kg)	Lasi (kg)
Ketjut	29 230	
Eristin		65 520
Yhteensä	29 230	65 520

Komposiittia on mallinnettu valitsemalla lasikuidun osuudeksi 50 % ja muovin osuudeksi 50 % materiaalin kokonaispainosta (Reynolds & Pharaoh 2010). Prosessointi on oletettu ruiskupuristukseksi, jonka päästökerrointa on käytetty laskennassa (Ecoinvent 2016). Eristinten kokoamisen päästöjä ei ole huomioitu lähtötietojen puuttumisen takia.

## Pylväät

Vuonna 2017 käyttöön otettiin yhteensä 365 voimajohtopylvästä, joista 12 oli sähköasemille sijoitettavia pylväsportaaleja. Niitä on käsitelty erikseen alaluvussa 5.5 *Sähköasemien materiaalit ja komponentit*. Taulukossa 7 on esitetty muiden pylväiden kappalemäärät ja painot pylvästyypeittäin jaoteltuna. Massat on annettu erikseen sekä 100 kV:n että 400 kV:n harustetuille ja vapaasti seisoville pylväille, joista jälkimmäisiin on laskettu mukaan myös peltopylväät (98 kpl). Pylväiden teoreettiset painot on laskettu Fingridin tyyppipylväspiirustusten tietojen perusteella. Jokaisen pylvään paino kerrottiin luvulla 1,1 todellisen tikkaat ja pultit sisältävän painon arvioimiseksi Fingridin tyyppipiirustusten ohjeiden mukaisesti. Kaikkien vuonna 2017 käyttöön otettujen pylväiden teräksen massa oli yhteensä noin 3 215 t.

**Taulukko 7.** Käyttöön otetut voimajohtopylväät.

Jännite	Yhteensä (kpl)	Harustetut		Vapaasti seisovat		Massa yhteensä (kg)
		Lkm (kpl)	Massa (kg)	Lkm (kpl)	Massa (kg)	
110 kV	145	72	2 200	73	6 600	638 700
400 kV	207	83	7 100	124	16 000	2 576 700
Yhteensä	352	155	-	197	-	3 215 400

Galvanoidun teräksen päästökerroin (2,7 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) on globaali keskiarvo kuumasinkitetylle malmipohjaiselle raaka-aineelle, sillä materiaalin tarkempia alkuperätietoja ei ollut saatavilla (World Steel Association 2018).

### Perustukset

Perustuspiirustusten pohjalta arvioidut perustusten painot ja määrät tyypeittäin on esitetty taulukossa 8. Pylväiden lukumäärät on eritelty taulukossa 7. Haruslaattojen määräksi on tässä työssä arvioitu pylvästä kohden neljä kappaletta. Harustetut pylväät on perustettu kahden elementin päälle. Peltopylväälle elementtejä tarvitaan yhteensä neljä kappaletta. Haruslaattojen ja valettujen perustusten painot on arvioitu piirustuksissa ilmoitetuista tilavuuksista käyttäen raudoitetulle betonille tilavuuspainoa 2 500 kg/m<sup>3</sup> (LKAB Minerals 2015). Yhteensä pylväiden perustuksiin käytettiin noin 15 039 t teräsbetonia.

**Taulukko 8.** Käyttöön otettujen pylväiden perustukset.

Jännite	Elementit		Haruslaatat		Valettu perustus		Yhteensä
	Lkm (kpl)	Massa (kg)	Lkm (kpl)	Massa (kg)	Lkm (kpl)	Massa (kg)	
110 kV	144	900	288	1 270	73	50 000	4 146 000
400 kV	166	2 480	332	2 280	26	280 000	8 447 000
400 kV (peltopylväs)	392	6 240					2 446 000
Yhteensä	702		620		99		15 039 000

Raudoitteen osuus betonissa vaihteli toimittajien välillä, ja laskennan yksinkertaistamiseksi käytettiin yhteistä päästökerrointa (0,24 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg) (Hammond & Jones 2008) teräsbetonin tuotannolle.

## 5.5 Sähköasemien materiaalit ja komponentit

Vuonna 2017 valmistui 8 sähköasemaprojektia, joiden päästöjä on arvioitu niiden rakenteiden, rakentamisen ja keskeisimmän laitteiston osalta.

## Rakenteet

Sähköasemien rakenteiden materiaalimääriä on arvioitu tarkemmin kahdelta urakoitsijalta saatujen sähköasemakohtaisten arvioiden perusteella, jotka on yleistetty kaikille vuonna 2017 käyttöönotetuille sähköasemille. Sähköasemalla käytetty materiaalimäärä on jaettu kenttien lukumäärällä, jolloin tulokseksi on saatu kenttäkohtaiset rakenteiden massat. Taulukossa 9 on esitetty sähköasemien rakenteiden massat edellä esitetyn perusteiden arvioituina. Yhteensä vuonna 2017 sähköasemien rakenteisiin käytettiin 1 477 t terästä ja 15 042 t betonia.

**Taulukko 9.** Käyttöönotettujen sähköasemakenttien rakenteet.

Materiaali	400 kV kentät	110 kV kentät	21/10 kV kentät	Muuntajaperustukset ja -bunkkerit	Yhteensä
Teräs (t)	35	14	7		
Teräsbetoni (t)	232	116	58	1650	
Lukumäärä (kpl)	37	12	2	3	
Yhteensä terästä (t)	1295	168	14		1 477
Yhteensä teräsbetonia (t)	8584	1392	116	4950	15 042

## Kaapelointi

Vuonna 2017 käyttöönotettujen sähköasemakaapeleiden pituudet arvioitiin Jylkän sähköaseman toisiokaapeloinneista tehdyn listauksen pohjalta. Listaus sisälsi sekä kenttä- että asemakohtaisia kaapelointeja, jotka kerrottiin tyyppin mukaan kahdeksalle käyttöönotetulle sähköasemalle ja uusille sähköasemakentille (kts. taulukko 9). Taulukkoon 10 on koottu kaapeleiden pituudet kaapelityypeittäin. Vuoden 2017 sähköasemakaapeleiden valmistukseen laskettiin kuluneen noin 76 t kuparia ja 87 t polyvinyylikloridia (PVC).

**Taulukko 10.** Käyttöönotetut kaapelit.

Kaapelityyppi	Pituus (km)	Kupari		PVC	
		Massa (kg/km)	Massa yhteensä (kg)	Massa (kg/km)	Massa yhteensä (kg)
MCCMK (3x6)	137,6	212	29161	258	35488
MCCMO (12x2,5)	101,6	320	32496	360	36558
MCMK (2x6)	37,4	159	5947	211	7891
MCMO (12x2,5)	27,0	320	8640	250	6750
Yhteensä	303,5	76200		86700	

Kaapelissa voi olla väliaineena PVC:n lisäksi myös muita muoviyhdisteitä, joiden koostumusta ei mallinnettu työssä päästölaskennan yksinkertaistamiseksi. Materiaalitietojen lähteenä käytettiin kaapelivalmistajien (Prysmian 2018; Reka Kaapeli 2018) tuotetietoja.

## Pylväsportaalit

Sähköasemien rakenteisiin kuuluvia pylväsportaaaleja otettiin käyttöön vuonna 2017 yhteensä 12 kappaletta. Niiden Fingridin tyyppipiirustuksista arvioidut materiaalmäärät on esitetty taulukossa 11. Yhteensä pylväsportaaaleihin käytetyn teräksen massa oli noin 125 t.

**Taulukko 11.** Käyttöön otetut pylväsportaalit.

Jännite	Yhteensä (kpl)	Pylväs keskimäärin (kg)	Paino yhteensä (kg)
110 kV	5	5540	27720
400 kV	7	13880	97 140
Yhteensä	12	-	124 860

## Laitteisto

Sähköasemalaitteiden hiilijalanjälkeä arvioitiin Jorgen et al. (2012b) perusteella kahdesta selvästi ilmastonmuutosvaikutuksiltaan merkittävimmästä laiteluokasta, GIS-asemista ja tehonmuuntajista. Laitteiden elinkaaripäästöjen arvioinnissa hyödynnettiin laitevalmistajan tuottamaa materiaalia. Taulukossa 12 on esitetty arvioidut laitteet ja niiden elinkaaritietojen lähteet.

**Taulukko 12.** Käyttöön otetut sähköasemalaitteet.

Laiteluokka	Hankinnat (lkm)	Elinkaaritietojen lähde
Tehonmuuntajat	3	Power transformer TrafoStar 500 MVA (ABB 2003b)
GIS-asemat	2	GIS Type ELK-14 for 300 kV (ABB 2007a)
Katkaisijat	40	Live Tank Circuit Breaker LTB 145 D (ABB 2007b)
Erottimet (400 kV)	24	Pantograph Disconnecter TFB 123–550 kV (ABB 2003a)
Erottimet (110 kV)	30	Center Breaker Disconnecter SGF 123–245 (ABB 2002)
Erottimet (20/10 kV)	3	Center Breaker Disconnecter SGF 123–245 (ABB 2002)

GIS-asemia mallinnettiin 300 kV:n kaasueristeisen kytkinlaitteiston ympäristöselosteen tietojen pohjalta. Arvion katsottiin sopivan hankituille laitteille, vaikka uudet asemat olivat todellisuudessa 110 kV:n ja 400 kV:n jännitteelle rakennettuja. Kaikki 3 hankittua tehonmuuntajaa olivat näennäisteholtaan 500 MVA referenssilaitteen tapaan. Elinkaari-tarkastelussa oli huomioitu myös muuntajaöljyn tuotanto. Kaikille katkaisijoille hyödynnettiin samaa ympäristöselostetta (ABB 2007b), sillä Harrisonin et al. (2010) mukaan suuremmille laitteille tehdyn skaalauksen vaikutus tuloksiin olisi ollut hyvin pieni. Pienemmät 20/10 kV:n erottimet arvioitiin 123 kV:n laitteiden perusteella sopivamman referenssilaitteen komponenttitietojen puuttumisen takia.

## 5.6 Varavoimalaitosten materiaalit ja komponentit

Tarkasteluvuonna 2017 tehtiin useita varavoimalaitoksiin liittyviä laitehankintoja. Taloudellisesti merkittävimpiä hankintoja olivat Huutokosken varavoimalaitoksen perusparannuksen yhteydessä hankitut uudet polttoainesäiliöt sekä Forssan varavoimalaitoksen pyörästyslaite- ja dieselmoottorihankinnat.

Varavoimalaitosten hiilijalanjälkeä on arvioitu panos-tuotoselinkaaritarkastelulla. Varavoimaloiden investoinnit sisälsivät paljon laitteita ja koneistoa, joiden prosessiperusteinen päästölaskenta ei ollut työn puitteissa mahdollista. Koska varavoimalaitoksiin kohdistuneet rahapanokset voitiin helposti erottaa kantaverkon investoinneista, panos-tuotomalli nähtiin käyttökelpoisena tapana arvioida näiden hankintojen kasvihuonekaasupäästöjä. Varsinaisten komponenttien ja laitteiden lisäksi panos-tuotomallilla on arvioitu myös rakentamisen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Vuonna 2017 käyttöönotettujen hankintojen toteutuneet investoinnit on esitetty taulukossa 13.

**Taulukko 13.** *Varavoiman investoinnit sektoreittain.*

IO-LCA-sektori	Kulut (€)
Turbiinit ja generaattorit	7 894 600
Muu koneisto	42 300
Suuren kokoluokan metallisäiliöt	3 457 500
Muuhun kuin asumiseen tarkoitettu rakennuttaminen	1 930 900
<b>Yhteensä</b>	<b>12 325 300</b>

Polttoaineiden valmistuksen ja kuljetusten kasvihuonekaasupäästöjen laskentaperusteet on arvioitu alaluvussa 5.8 *Polttoaineet*.

## 5.7 Rakentaminen ja muut palvelut

Rakentamisen ja muiden palveluiden päästöt on laskettu työkoneiden ja ajoneuvojen polttoaineenkulutuksen sekä työmaasähkön käyttömäärän perusteella. Käytetty polttoaine on oletettu moottoripolttoöljyksi (Nylund et al. 2016, s. 7), jonka päästöjä on arvioitu kevyen polttoöljyn päästökertoimella 2,65 kg CO<sub>2</sub>-ekv/l (Tilastokeskus 2017). Rikkoutumisen tai muun syyn vuoksi tehtyjä komponenttien vaihtoja ei ole huomioitu työssä niiden pienen merkityksen vuoksi (M. Jalonen, sähköposti 17.10.2018).

### Kasvuston käsittely

Vuonna 2017 johtoaukeaa raivattiin yhteensä noin 5 638 ha. Lisäksi johtoaukean reunavyöhykkeellä toteutettiin puunkorjuuta hakkuukoneella noin 972 ha:n alueelta. Latvasahausta helikopterilla tehtiin noin 160 km:n pituudelta voimajohtoaukeaa. Yksittäisten puiden kaato ja pylväsvälien raivaus niillä johdoilla, joiden käsittelytarve ei ajoitu odotetusti on jätetty huomioimatta niiden suhteellisen pienen määrän vuoksi.



Raivauksen keskimääräinen polttoaineenkulutus hehtaarilta arvioitiin urakoitsijalta saatujen tietojen perusteella (M. Karjalainen, sähköposti 16.8.2018). Puunkorjuun yhteydessä kuitupuu hyödynnetään kaupallisesti, ja hakkuukoneen käytön lisäksi päästöt on laskettu myös puun primäärikuljetuksille. Suomalaisen metsän puun tilavuus on keskimäärin noin 90 m<sup>3</sup>/ha (Metsäntutkimuslaitos 2014, s. 46), jota on käytetty Kilpelän et al. (2011) kuutiokohtaisten arvioiden muuntamisessa hehtaareiksi. Latvasahauksen päästöt on laskettu helikopterin kuluttaman lentopetrolin perusteella (A. Laitinen, sähköposti 20.7.2018). Kokonaisuudessaan vuonna 2017 kasvuston käsittelyyn kului moottoripolttoöljyä noin 137 350 l ja lentopetrolia noin 9 500 l, eli yhteensä noin 146 850 l polttoainetta. Arviot kasvuston käsittelyn polttoaineenkulutuksesta on koottu taulukkoon 14.

**Taulukko 14.** *Kasvuston käsittelyyn kuluneet polttoaineet.*

Käsittelytapa	Pinta-ala tai pituus (ha, km)	Kulunut polttoaine (l/ha, l/km)	Kulunut polttoaine yhteensä (l)	Lähde
Raivaus sahalla	3 383	5	15 223	M. Karjalainen, sähköposti 16.8.2018
Raivaus koneella	2 255	27	60 890	M. Karjalainen, sähköposti 16.8.2018
Puunkorjuu	972	63	61 236	Kilpeläinen et al. 2011
Latvasahaus	160	59	9 500	A. Laitinen, sähköposti 20.7.2018
Yhteensä			146 849	

### Kaukokartoitus

Vuonna 2017 toteutetuissa ilmakuvauksissa hyödynnettiin pienkoneita ja miehittämättömiä ilma-aluksia eli droneja. Taulukossa 15 on esitetty ilmakuvausten kilometrimäärät, polttoaineen laatu sekä kulutus kahdelle käytetylle konetyypille (R. Vinter, sähköposti 3.7.2018). Dronella toteutettuja kuvauksia ei ole otettu huomioon tässä tarkastelussa niiden vähäisestä määrästä johtuen. Polttoaineiden kokonaiskulutus oli noin 1931 l.

**Taulukko 15.** *Ilmakuvauksissa kuluneet polttoaineet.*

Konetyyppi	Lento-matka (km)	Nopeus (km/h)	Polttoaineen kulutus (l/h)	Kulutus yhteensä (l)	Polttoaine
Navajo	1557	240,8	114,0	737,4	Lentobensiini
Turbo Commander	1416	333,4	281,0	1193,7	Lentopetroli
Yhteensä				1931,1	

### Rakentaminen

Voimajohtojen rakentamiseen kuuluu useita eri vaiheita, joissa käytetään polttomoottori-käyttöistä koneistoa. Perustusten valamista tai upottamista edeltävät maankaivutyöt sekä pylväiden pystytys ja johdinten asentaminen varusteineen toteutetaan koneellisesti. Pylväiden ja muiden komponenttien kuljetukset työmaalle on arvioitu alaluvussa 5.9 Kom-

*ponenttien kuljetukset.* Suomen metsätieverkko on huomattavan kattava, joten mahdolliset voimalinjojen rakentamista varten tehdyt laajennukset on arvioitu vähäisiksi eikä niihin liittyviä päästöjä ole huomioitu tutkimuksessa (Saarinen et al. 2002).

Rakentamisen päästöt on arvioitu työkoneiden polttoaineen käytön sekä työmaasähkön kulutuksen perusteella. Voimajohtorakennuksen yhteydessä arvioinnissa hyödynnettiin Kjeldin et al. (2018) Norjan kantaverkkoyhtiö Statnetille toteuttamaa arvioita työkoneiden käytöstä voimajohtojen rakentamistoiminnan aikana, sillä projektikohtaisia tietoja ei ollut saatavilla tavoitetuilta Fingridin urakoitsijoilta. Arvioinnissa on hyödynnetty vuonna 2017 käyttöön otettujen pylväiden määrää (353 kpl) laskennan yksinkertaistamiseksi. Saatu kokonaiskulutus, 254 160 l polttoainetta, ei siis vastaa konkreettisesti vuoden 2017 aikana kulutetun polttoaineen määrää, mutta käyttöön otettujen pylväiden perusteella tehty arvio on nähty tarkkuudeltaan riittävänä. Lasketut arviot on esitetty taulukossa 16. Työmaasähkön kulutuksen on arvioitu olevan noin 6 MWh/kk. Kokonaiskäyttö on laskettu vuonna 2017 käynnissä olleille 16 voimajohtoprojektille maarakennustöiden ajalle 10 kuukaudelle, jolloin kokonaissähkönkulutukseksi saatiin 970 MWh

**Taulukko 16.** Voimajohtorakentamiseen kuluneet polttoaineet.

Työkone	Käyttöaika pylvästä kohden (h)	Työkoneen polttoaineen kulutus (l/h)	Polttoaineen kulutus pylvästä kohden (l)	Polttoaineen kulutus yhteensä (l)
Kaivinkone	40	15	600	211 800
Nostokurki	8	15	120	42 360
Yhteensä				254 160

Sähköasemarakentamisen päästöarvion pohjana olleet polttoaineenkulutustiedot saatiin suoraan urakoitsijalta. Sähköasemaprojektin maarakennustöihin arvioitiin kuluvan kuukausitasolla moottoripolttoöljyä noin 920 l (J. Roponen, sähköposti 31.8.2018). Keskimäärin projektien maarakennustöiden arvioitiin kestävän noin kuusi kuukautta. Polttoaineenkulutus laskettiin kaikille vuonna 2017 käynnissä olleille sähköasemaprojekteille (18 kpl), jolloin kuluneen polttoaineen määräksi saatiin yhteensä 99 360 l. Työmaasähkön kulutusarvio oli 350 kWh/kk, jolloin edellä esitetyillä laskentaperusteilla vuoden 2017 projektien sähkönkulutukseksi saatiin 37,8 MWh (J. Roponen, sähköposti 31.8.2018).

Voimajohdon uusimisen yhteydessä joudutaan purkamaan vanhaa voimalinjaa uuden johdon tieltä. Vuonna 2017 linjoja purettiin useammassa johtoprojektissa, yhteensä noin 22 km matkalta. Kjeldin et al. (2018) mukaan voimalinjojen purkuun kulununeen polttoainemäärän voidaan arvioida olevan 20 % pystytyksen kulutuksesta. Jos oletetaan kilometrin matkalla olevan noin 3 pylvästä, purun polttoaineenkulutus 22 km:n pituudelta lasketaan 66 pylväälle. Edellä esitettyjen arvioiden ja taulukon 16 tietojen perusteella vuonna 2017 toteutettujen voimajohtopurkujen kokonaispolttoaineenkulutukseksi saatiin 9 504 l moottoripolttoöljyä.

## Verkon kunnossapito

Asiantuntija-arvion mukaan voimajohto- ja sähköasemakunnossapidon yhteydessä palveluntarjoajat ajavat vuositasolla noin 830 000 km (M. Jalonen, sähköposti 17.10.2018; T. Heiskanen, sähköposti 18.10.2018). Kulkuvälineeksi on oletettu henkilöauto. Mahdollista työkoneiden käyttöä ei ole sisällytetty päästöarvioon, sillä sen määrä on arvioitu vähäiseksi. Fingridin omien työntekijöiden ajamat kilometrit on laskutettu kilometrikorvatuina työmatkoina ja arvioitu liikematkustamisen päästöinä (kts. alaluku 5.11 *Liikematkustaminen*).

## 5.8 Polttoaineet

Fingridin varavoimalaitoksissa käytetään polttoaineina pääasiassa kevyttä polttoöljyä sekä pieniä määriä lentopetrolia ja dieseliä. Lisäksi samaan päästökategoriaan on laskettu sytytyskaasuna käytetyn propaanin tuotannon päästöt. Yhteensä vuonna 2017 yhtiön omistamissa ja vuokraamissa varavoimalaitoksissa käytettiin yhteensä polttoainetta noin 2182 m<sup>3</sup>. Määrät polttoainelajeittain on esitetty taulukossa 17.

**Taulukko 17.** *Varavoimalaitosten polttoaineenkulutus.*

Polttoaine	Kulutus (m <sup>3</sup> )
Diesel	5,9
Kevyt polttoöljy	2130,1
Lentopetroli	44,5
Propaani	1,4
Yhteensä	2181,8

Voimalaitoksissa käytettyjen polttoaineiden epäsuorat eli tuotantoketjun (engl. well-to-tank, WTT) päästöt laskettiin DEFRA:n (2017) päästökertoimilla lentopetrolille, dieselöljylle sekä sytytyskaasulle ja Ecoinvent-tietokannan (2016) päästökertoimella kevyelle polttoöljylle (kts. liite A *Päästökertoimet*). Koska kevyen polttoöljyn WTT-päästökerroin 0,54 kg CO<sub>2</sub>-ekv/kg (Ecoinvent 2016) oli annettu hiilidioksidiekvivalentteina massan yksikköä kohden, kevyen polttoöljyn kuutiomäärä muunnettiin tonneiksi käyttäen Tilastokeskuksen (2017) oletustiheyttä 0,83 t/m<sup>3</sup>. Kevyen polttoöljyn massaksi saatiin 1768,0 t.

## 5.9 Komponenttien kuljetukset

Kuljetusten hiilijalanjälkeä on arvioitu kantaverkon valmiiden komponenttien osalta. Laskettujen komponenttien kuljetusmatkat ja -tavat on esitetty tonnikilometreinä (tkm) taulukossa 18. Kuljetukset Aasiasta ja Euroopan eteläosista Suomeen on arvioitu toteutettavan meriteitse Suezin kanavan läpi. Noin 25 % liikennöivistä konttilaivoista on kooltaan väliltä 1000–1999 TEU (IMO 2015, s. 134), joka on valittu valtamerikuljetusten ko-

koluokaksi myös tässä tutkimuksessa. Päästölaskentamallissa on oletettu, että komponentit kuljetetaan Rotterdamiin 1000–1999 TEU:n konttilaivalla, jonka jälkeen lasti siirretään pienempään, 0–999 TEU:n konttilaivaan Pohjanmeren ylitystä varten. Molempien laivatyyppien täyttöasteeksi on arvioitu 70 % ja nopeudeksi 17–19 solmua tunnissa (IMO 2009, s. 131). Maanteitse toteutetut matkat on mallinnettu täydellä lastilla kulkevalle 40 t:n puoliperävaunuyhdistelmälle (VTT 2017). Rautatiekuljetuksien päästökertoimenä on käytetty kansainvälistä tavaraliikenteen keskiarvoa (IEA & UIC 2015). Kaikki kuljetuksille käytetyt päästökertoimet ovat liitteessä A *Päästökertoimet*.

**Taulukko 18.** *Komponenttien kuljetusmatkat.*

Komponentti	Merikuljetus (tkm)	Maantiekuljetus (tkm)	Rautatiekuljetus (tkm)
Johtimet	7 318 000	511 700	
Pylväät	25 495 500	1 006 800	
Eristimet		377 300	
Muuntajat	19 367 100		48 000
GIS-asetat		74 900	
Katkaisijat		125 900	
Eroottimet		345 900	
Yhteensä	52 180 600	2 442 500	48 000

Suurin osa vuonna 2017 käyttöönotetuista johtimista oli valmistettu Turkissa. Vain pieni osa johtimista, arviolta noin 1 % eli käyttöönotetut OPGW-johtimet, olivat kiinalaista alkuperää. Tarkasteluvuonna pylväät oli valmistettu pääosin (80 %) kroatialaisessa tehtaassa, mutta pieniä pylväseriä ostettiin myös Kiinasta, Puolasta ja Turkista. Eristimet kuljetettiin Ukrainassa ja Unkarissa sijaitsevista tehtaista maanteitse.

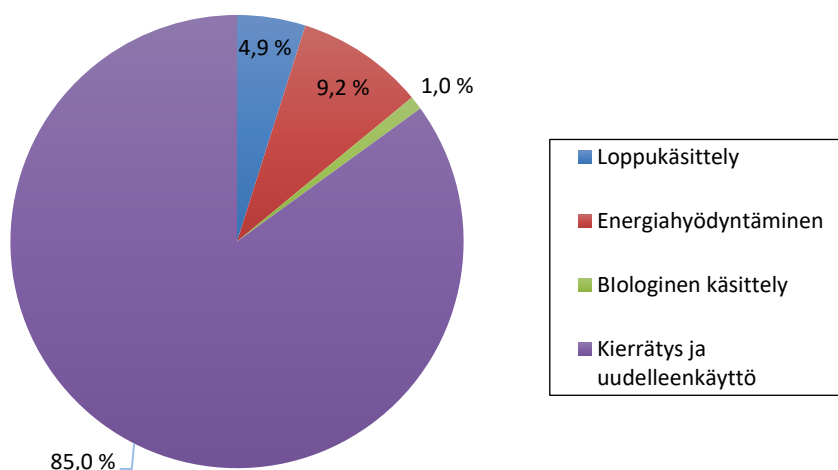
Sähköasemalaitteiden kuljetusten hiilijalanjälki arvioitiin samoille laiteryhmillä, jotka huomioitiin laskennassa alaluvussa 5.5 *Sähköasemien materiaalit ja komponentit*. Vuonna 2017 käyttöönotetut muuntajat valmistettiin Etelä-Koreassa, josta ne kuljetettiin meriteitse Helsinkiin. Lyhyet siirrot lähtösatamaan toteutettiin rautateitse. GIS-asemista toinen valmistettiin Sveitsissä ja toinen Saksassa, joista kuljetukset Suomeen tehtiin maanteitä pitkin puoliperävaunuyhdistelmillä. Muut sähköasemalaitteet, katkaisijat ja erottimet, kuljetettiin maanteitse Saksasta ja Alankomaista. Tarkemmat tiedot sekä voimajohto- että sähköasemakomponenttien kuljetusmatkoista ja lastien painoista on eritelty liitteeseen C *Kuljetukset*.

Koska vuoden 2017 käyttöönotot on tehty pääasiassa Etelä-Suomessa sijaitseville projekteille, Suomen sisäiseksi kuljetusmatkaksi komponenteille on arvioitu noin 150 km (K. Välimaa, haastattelu 11.9.2018). Kaikki käyttöönotetut muuntajat asennettiin rannikko-kaupungeissa sijaitseville sähköasemille, joten niiden raidekuljetuksia Suomessa ei sisällytetty laskentaan niiden vähäisen merkityksen vuoksi. Muiden komponenttien siirrot Suomessa toteutettiin puoliperävaunuyhdistelmillä.

## 5.10 Jätehuolto

Vuonna 2017 Fingridin jätehuoltopalveluista huolehti pääosin yksi palvelutarjoaja, jonka jätekirjanpitoa on hyödynnetty työssä (L&T 2018). Näistä arvioista puuttuvat esimerkiksi yksittäisten sähköasemien sekä toimistojen jätteet, joiden määrät on oletettu hyvin pieniksi muuhun jätehuoltoon verrattuna ja jätetty siksi laskennan ulkopuolelle. Syntyneestä jätteestä yhteensä noin 12 %:n osalta raportointi on ollut puutteellista, jolloin jätejakeen käsittelytapa on arvioitu muun tilastoinnin perusteella. Lisäksi verkon osien purun yhteydessä betoniperustukset jätetään paikoilleen piha-alueille ja pelloille, jolloin materiaalia ei ole sisällytetty jätehuollon kirjanpitoon. Kokonaisuudessaan hiilijalanjälki laskettiin 10 059 jätetonnille.

Kuvassa 11 on esitetty Fingridin vuonna 2017 tuottaman jätteen käsittelytavat prosenttiosuuksittain. Valtaosa, 85 % (8 549 t), jätteestä kierrätettiin tai uudelleenkäytettiin. Energiahyödynnetyn jätteen osuus oli noin 9 % (921 t), ja noin 1 % (98 t) jätteestä prosessoitiin biologisesti. Kaiken kaikkiaan vain noin 5 % (482 t) tuotetusta jätteestä loppukäsiteltiin eli kaatopaikkasijoitettiin tai poltettiin ilman energiahyödyntämistä. (L&T 2018)



**Kuva 11.** Tuotetun jätteen käsittelytavat (L&T 2018).

Jätteen uudelleenkäytön, kierrätyksen, biologisen käsittelyn ja energiahyödyntämisen päästöistä Fingridille on allokoitu ainoastaan jätteen kuljetuksen päästöt GHG Protocolin (2011) ohjeiden mukaisesti. Myöskään jätteen hyödyntämisestä aiheutuvia positiivisia ympäristövaikutuksia ei kohdisteta jätteen tuottajalle. Tällä laskentatavalla vältetään päästölaskennan päällekkäisyys eri toimijoiden välillä, sillä sekä kierrätetyn materiaalin että jäteperäisen energian käytön hiilijalanjälkeen oletetaan sisältyvän joko raaka-aineena tai polttoaineena toimivan jätteen prosessointi. Jätteen loppukäsittelyn kohdalla Fingridin kasvihuonekaasupäästöt on laskettu koko prosessille.

Taulukossa 19 on esitetty loppukäsitelty jäte käsittelytavoittain jaoteltuna. Suurin osa hyödyntämättömästä jätteestä oli vaarallista jätettä, jonka käsittelytavaksi on oletettu korkealämpötilapoltto. Runsaasti orgaanista ainesta sisältävän umpikaivolietteen päästökeroi oli annettu kuiva-ainestonnin kohden (1992,09 kg CO<sub>2</sub>-ekv/t) (Liu et al. 2013). Lietteen kuiva-ainespitoisuus laskettiin olettaen sen vesipitoisuuden olevan 98 % (IERE 2008, Roos 2008 mukaan), jolloin lietteen kuiva-aineen massaksi saatiin 0,51 t. Muun jättejakeen lisäksi vuoden 2017 aikana käsiteltiin noin 8,3 t pilaantunutta maata. Maa-aines sisälsi puhallushiekkaa, jolloin se voidaan kaatopaikkasijoittaa ilman erityisiä puhdistuskäsittelyitä (Korhonen et al. 2018, s. 63). Rakennusjätteen ja maa-aineksen kaatopaikkasijoituksen päästöjä käsiteltiin yhteisellä päästökertoimella.

**Taulukko 19.** *Loppukäsitelty jäte.*

Jätelaji	Määrä (t)	Käsittelymenetelmä
Vaarallinen jäte	255,6	Korkealämpötilapoltto
Rakennusjäte	201,1	Kaatopaikkasijoitus
Liete	25,5	Kaatopaikkasijoitus
Pilaantunut maa	8,3	Kaatopaikkasijoitus
Sekajäte	0,9	Kaatopaikkasijoitus

Jätteiden kuljetustiedot saatiin suoraan palveluntarjoajan raportointijärjestelmästä. Laskennassa huomioitiin ainoastaan palveluntarjoajan omalla kalustolla operoimat kuljetukset, sillä alihankkijoille ulkoistettujen ajosten tietoja ei oltu kerätty. Yhteen noudettuun jäte-erään kohdistettiin 22 km ajoa, johon oli sisällytetty jätteen varsinaisen kuljettamisen lisäksi ajoneuvon siirtymät noutopaikalle. Vuonna 2017 jäte-eriä noudettiin saatujen tietojen mukaan 191 kpl. Kuljetusten päästöt laskettiin dieselkäyttöiselle jäteautolle keski kulutuksella 40 l/100 km, jolloin polttoaineen kokonaiskulutukseksi saatiin noin 8 087 l. (L. Yli-Kovero, sähköposti 14.9.2018)

## 5.11 Liikematkustaminen

Kilometrikorvattujen automattojen päästökertoimenä on käytetty henkilöautojen keskimääräistä päästökerrointa vuodelle 2016 (152 g CO<sub>2</sub>-ekv/km) (VTT 2017). Matkojen on oletettu sisältäneen sekä maantie- että katuajoa. Lentomatkustamisen päästömäärät on saatu suoraan matkatoimistolta (SMT 2018). Lähtötiedot on esitetty taulukossa 20.

**Taulukko 20.** *Kilometrikorvatut automatkat ja lennot.*

Matkustustapa	Matkan pituus (km)
Kilometrikorvatut automatkat	1 601 117
Lentomatkat	3 646 403
Yhteensä	1 601 117

## 5.12 Työmatkat

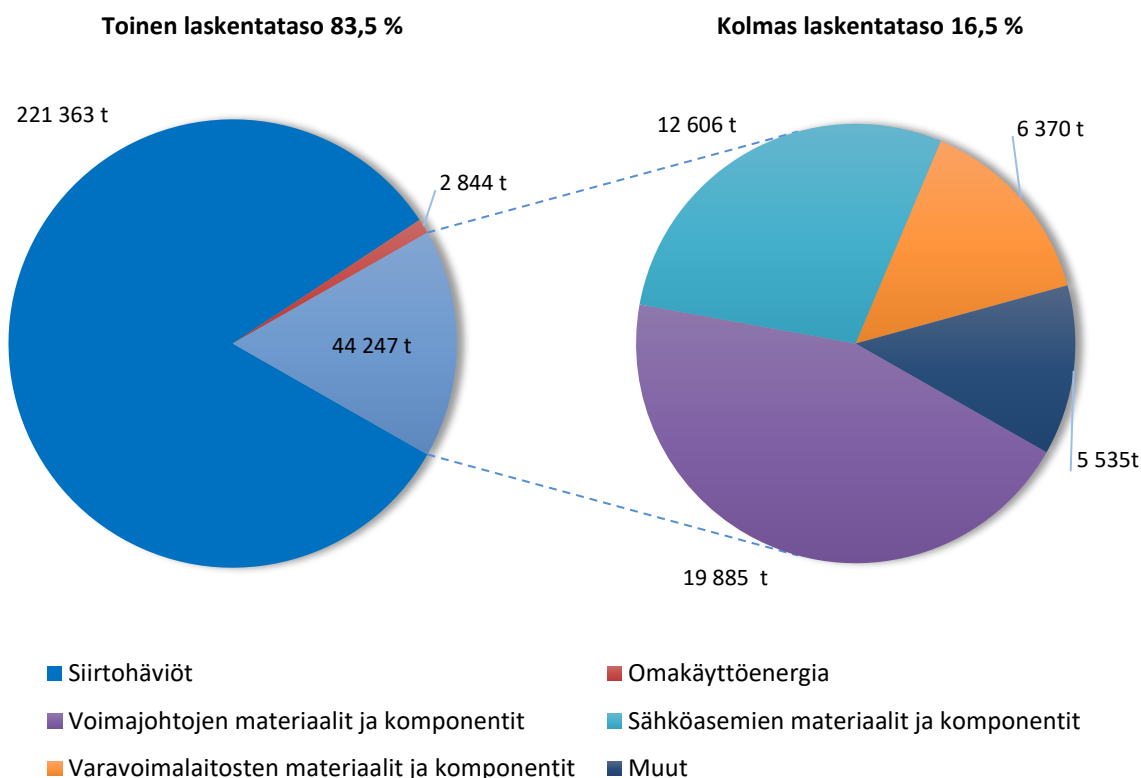
Vuonna 2017 Fingridin henkilöstömäärä oli yhteensä 355 henkilöä, joista noin 85 % työskenteli Helsingin toimipisteessä. Koko henkilöstön työmatkojen hiilijalanjälki arvioitiin pääkaupunkiseudun työmatkaliikennettä summaavan tilastotiedon perusteella. Liikenneviraston (2018) mukaan pääkaupunkiseudulla työpäivän aikana tehty matkasuorite oli keskimäärin noin 8,42 km, jonka jakautumista kulkutavoittain on esitetty taulukossa 21. Muu-kategoriaan lasketut matkat sisältävät esimerkiksi kotimaan lautta- ja lentoliikennettä, jotka on nähty Fingridin kohdalla epätodennäköisinä matkustustapavaihtoehtoina. Kategorian matkasuorite on lisätty henkilöautokilometreihin. Kaikki matkat on arvioitu henkilökilometreinä. Vuosittainen koko henkilöstölle arvioitu työmatkasuoritteen pituus on ilmoitettu taulukon viimeisessä sarakkeessa. Vuodessa 2017 oli yhteensä 251 työpäivää (ma-pe) arkipyhät vähennettyinä.

**Taulukko 21.** *Työmatkat kulkutavoittain.*

Kulkutapa	Osuus kaikista matkoista (%)	Arvioitu työmatkasuorite (km/vrk/hlö)	Työmatkasuorite yhteensä (km/a)
Jalankulku	3,5 %	0,30	26 398
Pyöräily	2,3 %	0,19	17 297
Bussi	9,5 %	0,80	71 326
Juna, metro tai raitiovaunu	11,5 %	0,97	86 341
Henkilöauto	65,1 %	5,49	488 832
Muu	8,1 %	0,68	60 594
<b>Yhteensä</b>	<b>100 %</b>	<b>8,43</b>	<b>750 788</b>

## 6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Fingridin epäsuorat päästöt olivat vuonna 2017 yhteensä 268 604 t CO<sub>2</sub>-ekv, joiden jakaantumisesta toiselle ja kolmannelle laskentatasolle on esitetty kuvassa 12. Tulosten perusteella 83,5 % päästöistä aiheutui yhtiön ulkopuolella tapahtuvasta energiantuotannosta eli toisen laskentatason päästölähteistä. Vain noin kuudesosa (16,5 %) kaikista epäsuorista päästöistä allokoitiin muihin epäsuoriin eli kolmannen laskentatason päästöihin. Siirrettyä kilowattituntia kohden toisen ja kolmannen laskentatason epäsuorat päästöt olivat 3,92 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh (Fingrid 2018j). Seuraavissa alaluvuissa on tarkennettu päästölaskennan tuloksia, vertailtu niitä aiempaan tutkimukseen sekä arvioitu käytettyjen laskentamethodien luotettavuutta ja mahdollisia päästövähennyskohteita. Päästömäärät kategorioittain on koottu myös liitteeseen D *Päästölaskennan tulokset*.



**Kuva 12.** Epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).

### 6.1 Toisen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt

Toisen laskentatason päästöt olivat yhteensä 224 207 t CO<sub>2</sub>-ekv tarkasteluvuonna 2017 (taulukko 22). Niistä valtaosan (98,7 %) muodostivat verkkohäviöitä kompensoivan energiantuotannon päästöt. Häviöiden lisäksi toisen laskentatason päästölähteiksi luetaan Fingridin ostama sähkö- ja lämpöenergia sekä vuokravaravoimalaitosten energiantuo-



tanto, joiden yhteenlaskettu hiilijalanjälki jäi 1,3 %:iin kaikista toisen laskentatason päästöistä. Tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että omakäyttöenergian määrää on arvioitu joko laskutetun sähkön tai yleistettyjen kaukolämmön kulutusmallien perusteella varsinainen energiankulutusmittausten sijaan.

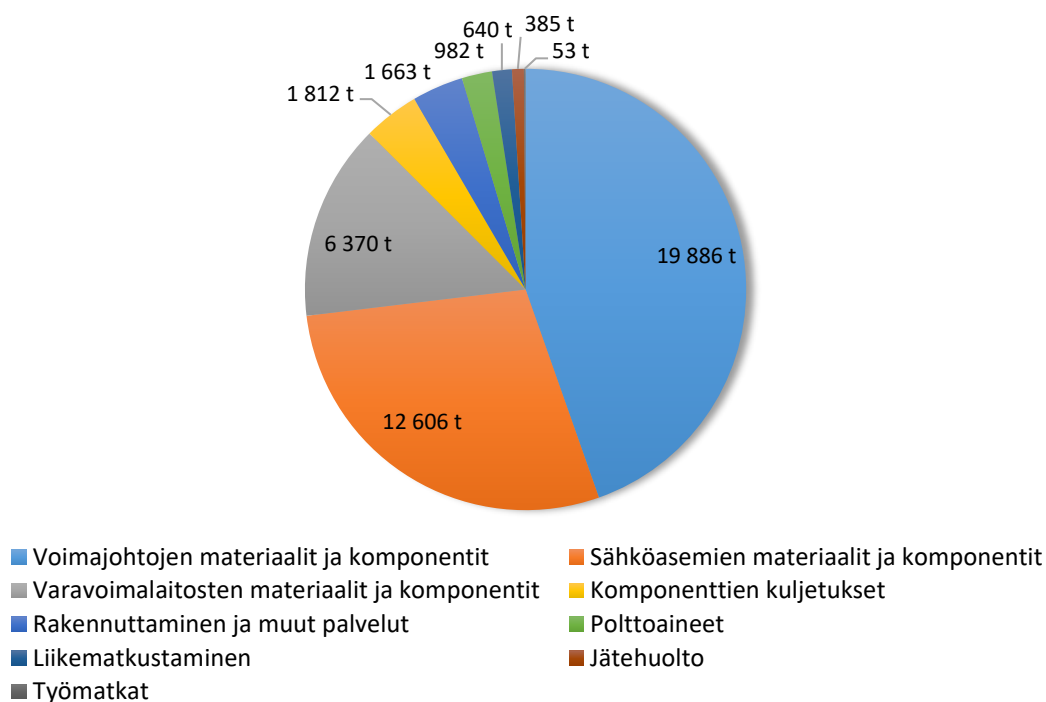
**Taulukko 22.** Toisen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017.

Päästölähde	Päästöt (t CO <sub>2</sub> -ekv)	Osuus toisen laskentatason päästöistä (%)
Ostosähkö*	2 669	1,2
Ostolämpö	175	0,1
Häviöt	221 363	98,7
<b>Yhteensä</b>	<b>224 207</b>	<b>100,0</b>

\* Sisältää myös vuokravaravoimalaitosten energiantuotannon

## 6.2 Kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt

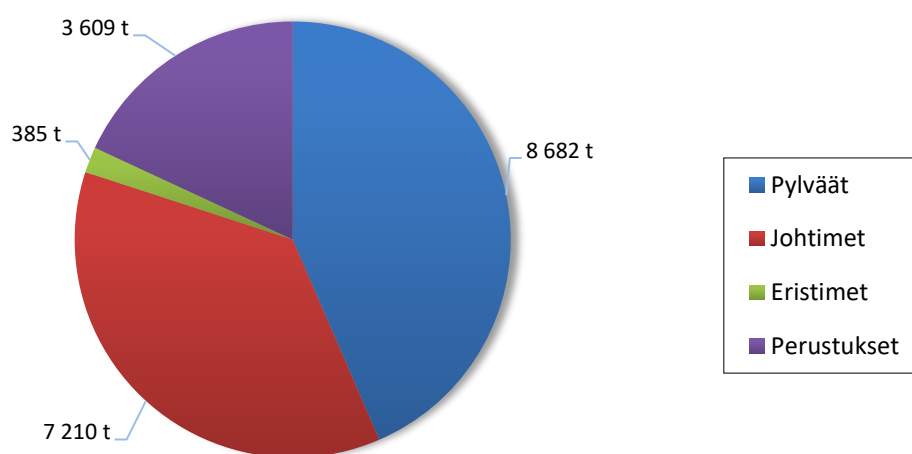
Yhteensä 44 397 t CO<sub>2</sub>-ekv muodostaneista kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöistä lähes puolet (44,8 %) kohdistettiin voimajohtojen materiaaleihin ja komponentteihin. Sähköasemien materiaalit ja laitteet edustivat toiseksi merkittävintä päästökategoriaa (28,4 %), jota varavoimalaitokset seurasivat kolmanneksi suurimpana (14,3 %) kolmannen laskentatason päästölähteenä. Kaikki kolmannen laskentatason päästökategoriat on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Kolmannen laskentatason kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).

### 6.2.1 Voimajohtojen materiaalit ja komponentit

Voimajohtojen materiaaleista ja komponenteista aiheutuneet päästöt olivat vuonna 2017 yhteensä 19 886 t CO<sub>2</sub>-ekv. Niiden jakaantuminen voimajohtokomponenteille on esitetty kuvassa 14. Pylväiden valmistus muodosti johtojen hiilijalanjäljestä noin 44 %, mikä selittyy suurella tuotantoon käytetyllä teräsmäärällä. Käyttöön otettujen johdinten tuotannosta aiheutuneet päästöt olivat vain noin 17 % pylväitä matalammat, vaikka asennettu kapasiteetti oli alle kolmanneksen pylväiden kokonaismassasta. Johdinten valmistuksen päästöintensiteetti on seurausta niihin käytetyn alumiinin korkeasta päästökertoimesta. Perustusten teräsbetoni aiheutti noin 18 % johtojen hiilijalanjäljestä. Taulukossa 23 on esitetty materiaalien ja valmistuksen hiilijalanjälki komponentittain.



**Kuva 14.** Voimajohtojen kasvihuonekaasupäästöt komponenteittain vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).

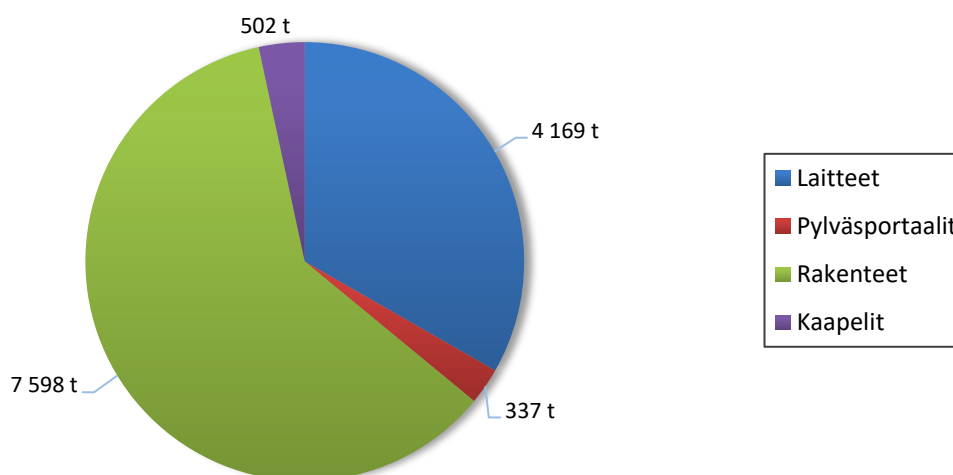
Eristinten tuotannosta aiheutuneet päästöt olivat yhteensä vain 1,9 % voimajohtojen hiilijalanjäljestä. Lasieristimien tuotannon päästöt (150 t CO<sub>2</sub>-ekv) olivat komponenttieroistinten tuotannon päästöjä (235 t CO<sub>2</sub>-ekv) noin 57 % suuremmat. Myös yhtä komponenttittain tehtävä tarkastelu ei ole kuitenkaan kovin soveltuva eristintyyppien väliseen vertailuun, sillä yhden komposiittieristimen massa on huomattavasti yhtä lasieristintä pienempi.

**Taulukko 23.** *Materiaalien ja valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt komponenttitonnille.*

Komponentti	Päästöt (t CO <sub>2</sub> -ekv/t)
Pylväät	2,70
Johtimet	7,83
Lasieristimet	1,58
Komposiittieristimet	2,88

### 6.2.2 Sähköasemien materiaalit ja komponentit

Sähköasemien yhteenlaskettu hiilijalanjälki oli 12 606 t CO<sub>2</sub>-ekv kattaen keskeisimpien laiteryhmiä sekä sähköasemarakenteiden päästöt. Päästöjen jakautumista on esitetty kuvassa 15. Asemarakenteiden hiilijalanjälki erottui suurimpana tekijänä (60,3 %) laske-  
tuista kokonaispäästöistä, mitä selittää niihin käytetyt betoni- ja teräsmassat. Kummankin materiaalin vaikutus kokonaispäästömäärään oli likimain yhtä suuri. Toiseksi merkittävin vaikutus hiilijalanjälkeen oli sähköasemalaitteilla (33,1 %), joiden päästöarvioon oli tosin sisällytetty vain osa laiteluokista. Kaapelien (4,0 %) ja pylväsportaalien (2,7 %) osuus sähköasemien hiilijalanjäljestä jäi molemmilla hyvin pieneksi.

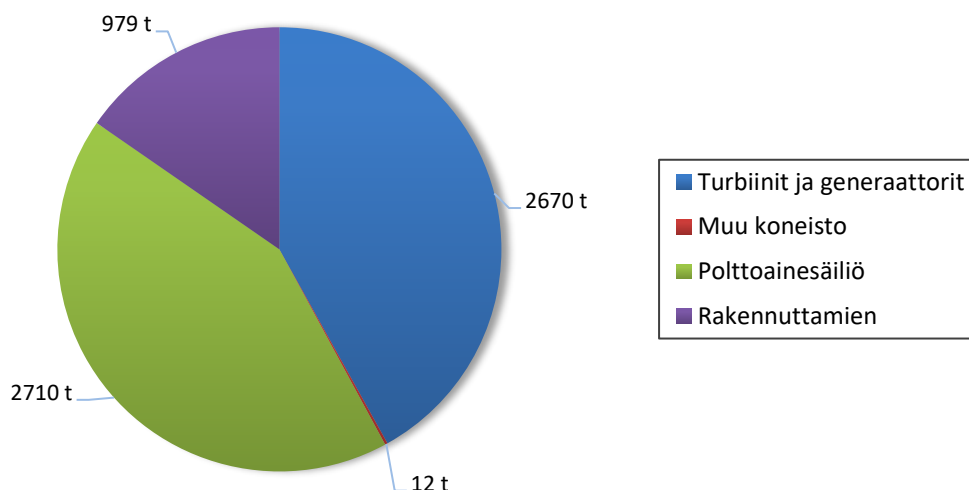


**Kuva 15.** *Sähköasemien kasvihuonekaasupäästöt komponenteittain vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).*

### 6.2.3 Varavoimalaitosten materiaalit ja komponentit

Panos-tuotosperusteisesti arvioitujen varavoimalaitosinvestointien hiilijalanjäljeksi saatiin 6 370 t CO<sub>2</sub>-ekv. Merkittävin päästölähde olivat tarkastelun perusteella suuren kokoluokan metallisäiliöt ja niiden tuotantoon liittyvät toiminnot (kuva 16). Noin 45 % metallisäiliöihin allokoitavista päästöistä syntyi raudan tai teräksen valmistusprosesseista (Car-

negie Mellon University Green Design Institute 2018). Toinen keskeinen tekijä varavoimalaitosinvestointien hiilijalanjäljen muodostumisessa olivat turbiinit ja generaattorit. Niiden päästöistä valmistusprosessien kuluttama energia ja teräksen tuotanto vastasivat kumpikin noin kolmasosalla. Päästöarvio sisälsi myös varavoimalaitosten rakentamisen päästöjä, jotka kattoivat noin 15 % investointien hiilijalanjäljestä.



**Kuva 16.** Varavoimalaitosten kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2017 (t CO<sub>2</sub>-ekv).

#### 6.2.4 Merkitykseltään pienemmät päästökategoriat

Kolmannen laskentatason merkitykseltään pienemmät päästökategoriat, kuljetukset, rakentaminen ja muut ostetut palvelut, polttoaineet, liike- ja työmatkustaminen sekä jätehuolto aiheuttivat yhteensä 12,4 % (5 535 t CO<sub>2</sub>-ekv) Fingridin kolmannen laskentatason päästöistä. Kaikkiin epäsuoriin päästöihin suhteutettuna osuus oli 2,1 %.

Komponenttien kuljetukset olivat infrastruktuurin materiaalien ja komponenttien tuotannon jälkeen merkittävin kolmannen laskentatason päästölähde aiheuttaen 4,1 % (1 812 t CO<sub>2</sub>-ekv) kolmannen laskentatason päästöistä. Pylväiden kuljetukset muodostivat yli puolet päästökategorian hiilijalanjäljestä, mikä selittyy hankintojen suurella määrällä. Myös muuntajien mannertenväliset kuljetukset näkyivät päästöarvioissa selvästi, ja kolme vuonna 2017 käyttöönotettua laitetta vastasivat yksin noin 35 %:sta kuljetusten hiilijalanjälkeä. Muiden sähköasemalaitteiden sekä eristinten kuljetusten painoarvo jäi kuljetusten kokonaispäästöissä noin prosenttiin.

Verkon rakentamisen ja muiden palveluiden päästöt muodostuivat suurimmaksi osaksi palveluntarjoajien työkalujen käytöstä ja kattoivat yhteensä 3,7 % (1 663 t CO<sub>2</sub>-ekv) kaikista kolmannen laskentatason päästöistä. Erityisesti maankaivutyöt aiheuttivat runsaasti päästöjä tällä toiminta-alueella. Tulosten perusteella voimajohtorakentamisen päästöt olivat yli kolminkertaiset sähköasemarakentamisen päästöihin verrattuna, ja yhteensä

niiden osuus oli noin 51 % päästökategorian päästöistä. Kasvuston käsittely oli varsinaisen rakentamisen ohella merkittävä päästölähde muodostaen noin 23 % rakentamisen ja palveluiden päästöistä. Kunnossapidon, kaukokartoituksen ja voimajohtojen purun yhteenlaskettu osuus päästökategorian hiilijalanjäljestä oli vain alle kymmenesosan.

Varavoimaloissa käytettyjen polttoaineiden tuotantoketjujen päästöt muodostivat 2,2 % (982 t CO<sub>2</sub>-ekv) kolmannen laskentatason epäsuorista päästöistä. Näistä suurin osa (97 %) oli peräisin kevyen polttoöljyn tuotannosta sen huomattavien käyttömäärien vuoksi.

Jätehuollosta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt olivat 0,9 % (385 t CO<sub>2</sub>-ekv) yhtiön kolmannen laskentatason päästöistä. Tuloksia arvioitaessa on huomioitava, että tutkimuksessa sovellettu lähestymistapa allokoii yhtiölle ainoastaan jätteen kuljetuksista ja loppukäsittelystä aiheutuvat päästöt (GHG Protocol 2011). Valtaosan, noin 92 %, jätehuollon hiilijalanjäljestä muodostivat vaarallisen jätteen poltosta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt käsittelytavan korkeasta päästökertoimesta johtuen. Seuraavaksi suurin vaikuttaja (4,8 %) kokonaispäästöjen määrään olivat jätteiden keräyksestä ja kuljetuksesta syntyneet päästöt. Tutkimuksessa ei huomioitu palveluntarjoajan alihankintana toteuttamia kuljetuksia, mikä vaikuttaa tehtyihin päästöarvioihin alentavasti.

Liikematkustamisen päästöt muodostivat 1,4 % (640 t CO<sub>2</sub>-ekv) kolmannen laskentatason päästöistä. Lentomatkustaminen oli merkittävin henkilöstön liikkumisesta aiheutuvien päästöjen lähde aiheuttaen noin 57 % liikematkustamisen hiilijalanjäljestä. Lennetyn kilometrin päästöt olivat keskimäärin noin kolminkertaiset maanteitse kuljettuun kilometriin verrattuna.

Työmatkojen vaikutus kolmannen laskentatason päästöjen määrää oli hyvin vähäinen, 0,001 %. (53 t CO<sub>2</sub>-ekv). Koska tulokset perustuivat keskiarvoihin pääkaupunkiseudun matkaluvuista ja kulkutavoista, saatu päästömäärä on suoraan verrannollinen Fingridin henkilöstömäärään.

### 6.3 Vertailu aiempaan tutkimukseen

Vertaisarvioitua tieteellistä tutkimusta kantaverkkoyhtiöiden hiilijalanjäljestä ei ole saatavilla, joten työn tuloksia vertailtiin kantaverkkoyhtiöissä tuotettuun materiaaliin sekä sähkönsiirtoverkosta toteutettuihin elinkaarianalyysihin. Useammassa elinkaaritutkimuksessa *hiilijalanjälki*-termillä viitataan siirtohäviöistä ja koko olemassa olevan infrastruktuurin rakentamisesta aiheutuneisiin kasvihuonekaasupäästöihin (kts. Hrólfssdóttir et al. 2014; Harrison et al. 2010), mikä ei vastaa tämän tutkimuksen määritelmää verkon hiilijalanjäljestä. Tästä syystä kirjallisuudessa esiintyviä lukuja ei voida suoraan verrata saatuihin tuloksiin, joissa hiilijalanjälkeen on sisällytetty ainoastaan tarkasteluvuoteen allokoitavia kasvihuonekaasupäästöjä GHG Protocolin (2011) ohjeiden mukaisesti.

### 6.3.1 Kantaverkkoyhtiöiden hiilijalanjälkianalyysit

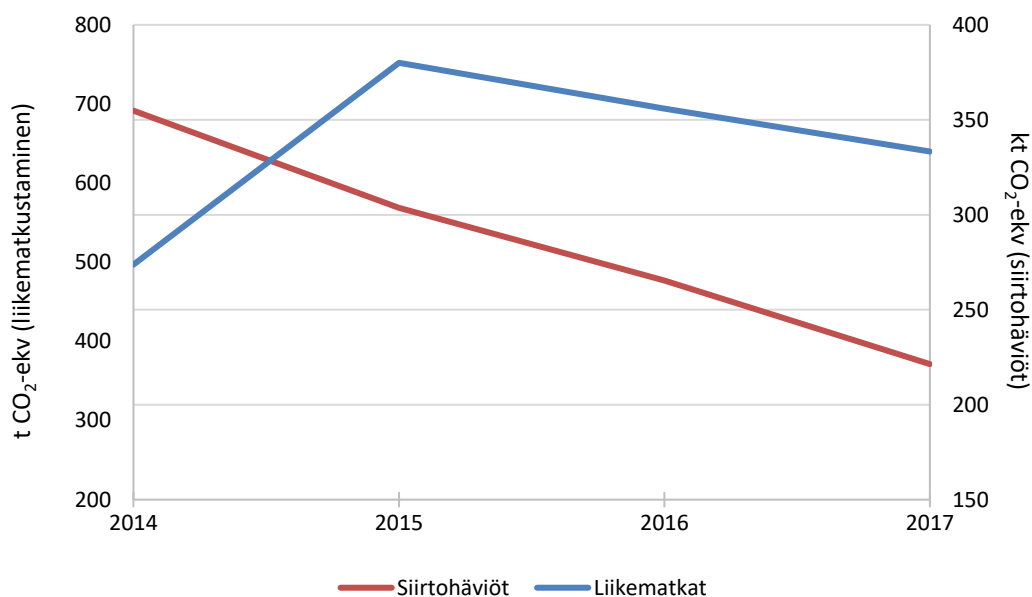
Siirtohäviöt ovat kiistatta merkittävin yksittäinen kantaverkon hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä, vaikka niiden määrät vaihteleva tutkimusten välillä käytetystä laskentatavasta, verkon kapasiteetista sekä häviötasosta riippuen. Kattavia hiilijalanjälkianalyysijä toteuttaneiden kantaverkkoyhtiöiden Elia ja REEn häviötaso (1,3 %) on hyvin lähellä Fingridin vastaavaa lukemaa (1,4 %), mutta häviösähkön osuudet epäsuorista päästöistä vaihtelevat yli kymmenellä prosenttiyksiköllä yhtiöiden välillä (Elia 2018; Fingrid 2018j; REE 2018). REEllä absoluuttinen häviöille laskettu hiilijalanjälki on 3–4,1 -kertainen Elia ja Fingridin häviöihin verrattuna suuresta sähkönsiirtokapasiteetista johtuen. Häviöiden osuus epäsuorista päästöistä on REEllä tästä huolimatta kolmesta yhtiöstä matalin, 68 %. Eroa selittää osin REEn vuonna 2017 tekemät laajat verkkoinvestoinnit, jotka kasvattavat kolmannen laskentatason päästöjen määrää (REE 2018). Elialla häviösähkön ilmastovaikutus on laskettu noin puoli prosenttiyksikköä Fingridiä matalammaksi kaikkiin epäsuoriin päästöihin suhteutettuna.

Kaikissa kolmessa kantaverkkoyhtiössä kolmannen laskentatason päästöistä yli 90 % aiheutui infrastruktuurista sekä ostetuista palveluista ja muista tuotteista. Tarkempi erittely ei ollut mahdollista raporttien vaihtelevien päästöjen ryhmittelytapojen vuoksi. Elia (2018) toiseksi merkittävin päästölähde oli työntekijöiden liikematkustaminen 8 %:lla kaikista kolmannen laskentatason päästöistä, kun taas Fingridillä saman kategorian painoarvo oli vain 1,6 %. REEllä (2018) puolestaan peräti 98 % päästöistä allokoitiin ostettuihin komponentteihin ja palveluihin, mikä voidaan jälleen johtaa yhtiön vuonna 2017 tekemien verkkoinvestointien määrästä. Kaikkien epäsuorien päästöjen summa siirrettyä energiayksikköä kohden oli Elialla 4,04 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh, ja REEllä 3,70 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh (Elia 2018; REE 2018), joiden väliin Fingrid sijoittui lukemalla 3,92 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh.

Fingridin kohdalla vertailukelpoisia päästötietoja aiemmilta vuosilta oli saatavilla siirtohäviöiden ja liikematkustamisen päästöjen osalta. Päästömäärien kehitystä molemmille päästölähteille on esitetty kuvassa 17. Häviöiden kohdalla päästömäärien lasku on ollut jatkuvaa tarkasteluvuosien 2014–2017 aikana. Myös häviötaso on laskenut samalla aikavälillä 0,2 prosenttiyksikköä. (Fingrid 2018j) Häviöiden hiilijalanjäljen pienenemiseen vaikuttaa niiden absoluuttisen vähenemisen lisäksi käytetyn sähköntuotannon päästökerroimen vuosittainen vaihtuminen. Liikematkustamisen hiilijalanjälkeen on vuodesta 2015 eteenpäin laskettu kilometrikorvatut työmatkat, mikä selittää vuosina 2014–2015 tapahtunutta päästömäärien kasvua. Vuosina 2015–2017 liikematkustamisen päästöt ovat vähentyneet tasaisesti lentomatkustamiselle osoitettujen päästöjen mukana. Myös kilometrikorvatuille työmatkoille käytetty päästökerroin on vaihdettu vastaamaan uudempaa ja vähäpäästöisempää autokantaa tarkastellulla aikavälillä. (Fingrid 2015; Fingrid 2016; Fingrid 2017; Fingrid 2018j)

Tässä tutkimuksessa arvioitujen epäsuorien päästöjen määrä oli 19,6 % yhtiön vuoden 2017 vuosikertomuksessa esitettyä lukemaa korkeampi. Vuosikertomuksessa raportoidut suorat päästöt mukaan luettuna yhtiön kokonaishiilijalanjälki kasvoi 19,0 %:lla. (Fingrid

2018j) Noin viidesosaa yhtiön vuosikertomuksessa raportoidusta hiilijalanjäljestä vastaava kasvu johtui aiempaa selkeästi laajemmasta tutkimusrajauksesta, joka sisällytti useita aikaisemmin huomiotta jätettyjä päästökategorioita.



**Kuva 17.** Fingridin siirtohäviöiden ja liikematkustamisen päästöjen kehitys vuosina 2014–2017 (Fingrid 2015; Fingrid 2016; Fingrid 2017; Fingrid 2018j).

### 6.3.2 Tutkimuskirjallisuus

Tässä tutkimuksessa voimajohtoihin allokoitiin noin 52 % materiaalien ja komponenttien tuotannon ja kuljetusten päästöistä. Ilman varavoimalaitosten painoarvoa vastaava luku oli 61 %. Jorgen & Hertwichin (2013) tutkimus norjalaisen kantaverkon elinkaaren ympäristövaikutuksista vastaa tässä saatuja tutkimustuloksia: selvästi merkittävien infrastruktuurin materiaaleihin ja komponenttien valmistukseen liittyvä kasvihuonekaasupäästölähde olivat voimajohdot 63 %:lla lasketusta verkon rakenteiden ilmastomuutosvaikutuksesta. Myös Harrison et al. (2010) ovat kohdistaneet yli puolet (51 %) Ison-Britannian kantaverkkomateriaalien ja -komponenttien valmistuksen kasvihuonekaasupäästöistä voimajohtoihin. Hiilijalanjälkitutkimuksen tuloksia elinkaaritutkimuksiin verrattessa on kuitenkin tärkeää huomata tutkimusrajausten eroavaisuudet: esitellyissä elinkaarianalyysissä päästöt on järjestäen laskettu koko olemassa olevalle infrastruktuurille, kun taas tässä työssä tutkimuskohde on ollut Fingridin toiminta ja siihen liittyvä rakentaminen yhden vuoden ajalta. Tällöin hankittujen komponenttien määrien keskinäiset suhteet eivät välttämättä vastaa koko kantaverkon suhdelukua, jolloin vertailtavuus elinkaaritutkimuksiin kärsii. Myöskään kuljetusten mallinnustapoja ei oltu eritelty verrokkitutkimuksissa selkeästi.

Suoritetun päästölaskennan perusteella pylväiden tuotannon ilmastovaikutukset olivat ilman kuljetuksia noin 20 % ja kuljetukset mukaan luettuna noin 28 % johtimia merkittävämmät, mikä eroaa esimerkiksi Jorgen et al. (2012a) arviosta Norjan sekä Harrisonin et al. (2010) arviosta Britannian kantaverkon johdinten materiaalien ja valmistuksen vaikutuksesta infrastruktuurin kokonaishiilijalanjälkeen. Molemmissa elinkaarianalyysissä johtimet olivat suurin kasvihuonekaasupäästöjen lähde toteutetuissa siirtoverkon elinkaarianalyysissä. Myös Hrólfsdóttir et al. (2014) nostavat siirtohäviöiden jälkeen tärkeimmäksi osatekijäksi islantilaisen kantaverkon ilmastovaikutuksissa johdinten alumiinin. Pylväiden huomattava painoarvo tässä tutkimuksessa johtuu suurilta osin käytetystä päästökertoimesta, joka on tässä tutkimuksessa valittu vastaamaan globaalia keskiarvoa neitseelliselle galvanoidulle teräkselle. Esimerkiksi Kjeldin et al. (2018) norjalaisten suurjännitepylväiden materiaaleille laskema hiilijalanjälki on pylvästonnia kohden 26–29 % tämän tutkimuksen tuloksia matalampi. Kjeldin et al. (2018) tutkimuksessa materiaali on oletettu eurooppalaiseksi, ja tekijät arvioivat globaalien päästökertoimien käytön johtavan noin 24 % korkeampiin päästöarvioihin. Myös kaikki kuljetukset on oletettu Euroopan sisäiseksi. Eristinten painoarvo voimalinjinfrasestruktuurin päästöistä on arvioitu alle kymmenesosaan saatavilla olevassa kirjallisuudessa sekä tässä tutkimuksessa (Hrólfsdóttir et al. 2014; Jorge et al. 2012a).

Tutkimuskirjallisuudessa erityisesti sähköasemien elinkaariarviointi on nähty hankalana tehtävänä, joka on pitkälti laitevalmistajilta saatujen tuotekohtaisten ympäristöselosteiden varassa (Hrólfsdóttir et al. 2014). Tässäkin tutkimuksessa laitteiston arviointi rajattiin kirjallisuuden perusteella valittuihin merkittävimpiin laiteluokkiin, tehonmuuntajiin, GIS-asemiin ja kytkinlaitteisiin (Jorge & Hertwich 2013). Jorgen & Hertwichin (2013) mukaan sähköasemien laitteet vastasivat yhteensä noin 20 %:a infrastruktuurin hiilijalanjäljestä ilman SF<sub>6</sub>-päästöjen ja häviöiden ilmastovaikutuksen huomioonottamista. Tässä tutkimuksessa sähköasemalaitteiden valmistuksen ja kuljetusten ilmastovaikutus oli noin 14 % infrastruktuurin hiilijalanjäljestä varavoimalat pois lukien.

Saatujen tulosten mukaan rakentamisen ja muiden palveluiden hiilijalanjälki oli vain 0,6 % yhtiön kokonaispäästöistä. Pelkästään voimajohtojen ja sähköasemien infrastruktuuriin liittyviin päästöihin verrattuna lukema oli 4,6 %. Määrä on hieman verrokkitutkimusten tuloksia matalampi: esimerkiksi Harrisonin et al. (2010) ja Hrólfsdóttirin et al. (2014) mukaan rakentamisen ja kunnossapidon osuudet infrastruktuuriin allokoitavista päästöistä olivat 7 % ja 19 %. Tulosten hajonta voidaan jälleen selittää vaihteluilla tutkimusrajauksissa. Molemmat elinkaaritutkimukset sisälsivät muun muassa pitkiä matkoja maakaapelin asennustyötä, jonka vaikutus rakentamisen päästöihin oli selkeä. Kunnossapitotoimenpiteiden osuus palveluiden hiilijalanjäljestä oli hyvin pieni sekä tässä tutkimuksessa että muussa kirjallisuudessa (Harrison et al. 2010; Hrólfsdóttir et al. 2014; Jorge & Hertwich 2013).



## 6.4 Päästövähennysmahdollisuudet

Koska noin 83 % Fingridin epäsuorista päästöistä muodostuu siirtohäviöitä kompensoivan energiantuotannon päästöistä, muihin päästölähteisiin vaikuttamisella saavutettavat päästövähennykset ovat kokonaispäästöihin suhteutettuna matalat. Pienemmistä päästölähteistä vähennystoimien kohteiksi kannattaisi siis valita ne toiminnot, joihin yhtiöllä on mahdollisimman suuret vaikuttamismahdollisuudet ja päästövähennystavoitteiden onnistumisen seuraaminen mitattavissa.

Siirtohäviöt ovat paitsi Fingridin merkittävin päästölähde myös keskeinen yksittäinen menoerä yhtiön vuosibudjetissa (Fingrid 2018a). Häviöiden minimoiminen otetaan huomioon verkon suunnittelussa jo pelkästään yritystaloudellisin perustein. Vaikutusmahdollisuudet siirtohäviöiden suuruuteen ovat kuitenkin rajalliset, ja sähkön siirto suurjänniteverkossa pienentää itsessään häviöiden määrää verrattuna sähkön jakeluun keski- ja pienjänniteverkossa. Kaiken kaikkiaan siirretyn kWh:n ilmastovaikutukset vähenevät jännitteen nostamisen myötä edellyttäen, että verkon rakennejännite ja käyttöjännite ovat yhtä suuret (Arvesen et al. 2014; Hrólfssdóttir et al. 2014).

Toinen merkittävä häviöiden hiilijalanjälkeen vaikuttava tekijä on sähköntuotannon päästökerroin: yhteiskunnan siirtyessä uusiutuvien energiantuotantomuotojen käyttöön myös häviöistä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt vähenevät (Arvesen et al. 2014; Harrison et al. 2010; Jorge et al. 2012a; Jorge & Hertwich 2013). Jos Suomen sähköntuotannon päästökerroin laskisi Seppälän et al. (2017, s. 5) asiantuntija-arvion mukaisesti arvoon 75 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh vuoteen 2030 mennessä, saavutettu häviöihin liittyvä päästövähennys olisi noin 48 % vuoden 2017 epäsuoriin päästöihin suhteutettuna. Jos häviötaso samanaikaisesti alenisi, häviösähkön ilmastovaikutukset vähenisivät tätäkin enemmän.

Jännitetason ja sähköntuotannon päästökertoimen ohella muita merkittäviä häviötasoon vaikuttavia tekijöitä ovat verkon komponenttien valinnat ja niiden sijoittelu. Uusilla johtojärjestelyillä ja verkkoinvestoinneilla voidaan usein vähentää verkon häviöitä joko jännitteen noston tai energiatehokkaamman laitteiston myötä. Samanaikaisesti infrastruktuuriin tehdyt investoinnit kuitenkin kasvattavat kolmannen laskentatason päästöjen määrää. Hiilijalanjälkianalyysin tulosten perusteella kokonaispäästöjen kannalta kaksi merkittävintä komponenttiluokkaa olivat pylvää ja johtimet, joiden valmistuksen päästöihin vaikuttamisella voidaan saavuttaa huomattavia päästövähennyksiä. Erityisesti uusiomateriaalien hyödyntämisellä päästömääriin voidaan vaikuttaa merkittävästi (kts. alaluku 6.5.2 *Materiaalivalinnat*). Myös elinkaaritarkasteluja vaihtoehtoisista valmistusmateriaaleista voidaan toteuttaa (kts. Blackett et al. 2008; Kjeld et al. 2018). Sähköasemalaitteiden valmistuksen hiilijalanjälki on pieni suhteutettuna niiden käytön aikaisten häviöiden hiilijalanjälkeen. Energiatehokkaampiin laitteisiin investointi on toimivin tapa vaikuttaa laitteiden elinkaarenaikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Laitteiden energiatehokkuuden lisääminen saattaa kuitenkin edellyttää materiaali- ja energaintensiivisempiä valmistusmenetelmiä, joiden suhdetta toisiinsa on hyvä tarkastella. (Jorge et al. 2012b; Kieffel et al. 2014)

Fingridin hankintoja ohjaa erityisalojen hankintalaki (1398/2016), joka asettaa rajoituksia valmistajien kilpailuttamisen ehdoille. Hankintojen kohteilta eli tässä tapauksessa voimajohtokomponenteilta voidaan edellyttää ympäristönäkökohtiin liittyviä vähimmäisvaatimuksia, kuten tiettyä uusioraaka-aineen käyttöprosenttia komponentissa. Myös kokonaisuhiilijalanjälkeä voidaan käyttää laatukriteerinä, jolloin kuljetusten päästöt on mahdollista ottaa huomioon kilpailutuksessa. (L. 29.12.2016/1398) Tutkimuksen tulosten perusteella ilmastovaikutusten sisällyttäminen hankintojen laatukriteereihin olisi erityisen tärkeää pylväs- ja voimajohtovalmistajien kohdalla.

Materiaalien hankinta ja komponenttien valmistus tapahtuvat usein pitkien alihankintaketjujen päässä Suomen rajojen ulkopuolella. Yhtiön kotimaassa tapahtuvia toimintoja ja henkilöstön toimintaan vaikuttamista voidaan pitää ainakin näennäisesti suoraviivaisempina mahdollisuuksina pienentää hiilijalanjälkeä. Tutkimuksen yhteydessä selvisi, etteivät Fingridin hyödyntämät palveluntarjoajat laskeneet esimerkiksi työkoneiden polttoainekulutustietoja tai käytetyn työmaasähkön määrää projektikohtaisesti. Samoin kuin komponenttihankintojen kohdalla, myös ostettujen palveluiden päästöraportointi voitaisiin nähdä etuna kilpailutuksen yhteydessä. Kasvuston käsittely vastasi lähes kolmasosaa ostettujen palveluiden päästöistä, joten pyrkimistä Fingridin maankäyttö- ja ympäristöpolitiikan (Fingrid 2018b) mukaiseen olemassa olevien johtokäytävien hyödyntämiseen voidaan suositella myös päästövähennyksien kannalta. Hakkuisiin liittyy myös tämän työn ulkopuolelle jätetty hiilinielunäkökulma, joka on kuitenkin tärkeä tekijä kansainvälisissä hiilineutraaliuspyrkimyksissä (IPCC 2018).

Energiankulutusta toimistoissa ja sähköasemilla ei ole aikaisemmin mitattu Fingridin toimesta, ja myös tämän tutkimuksen puitteissa tehty päästöarvio on lähinnä suuntaa antava. Koska parhaassa tapauksessa toimitilojen sähkön ja lämmön kulutukseen voidaan vaikuttaa hyvinkin arkipäiväisillä toimilla, kulutuksen todellista määrää sekä ajallista ja paikallista vaihtelua ehdotetaan selvitettäväksi. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella omakäyttöenergian kulutuksen vähentäminen 30 %:lla laskisi Fingridin epäsuoria päästöjä ilman häviöiden huomioimista noin 2 % (853 t CO<sub>2</sub>-ekv).

Liikematkustaminen on esimerkki toisesta päästölähteestä, johon yrityksessä on mahdollista vaikuttaa myös työntekijätasolla. Noin 24 % lennetyistä matkoista ja 14 % syntyneistä liikematkailun kasvihuonekaasupäästöistä muodostui Suomen sisäisistä lennoista, joiden vaihtaminen esimerkiksi raideliikenteeseen olisi realistista. Näin saavutettu päästövähennys olisi noin 54 t CO<sub>2</sub>-ekv, joka vastaa kuitenkin vain alle prosenttia kolmannen laskentatason päästöistä. Myös etäyhteyksien hyödyntämistä mahdollisimman laajassa mittakaavassa suositellaan.

## 6.5 Tulosten luotettavuus ja mahdolliset virhelähteet

Tuotteen, palvelun tai yrityksen aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen tarkastelu sisältää aina huomattavia epävarmuustekijöitä (Huang et al. 2009). Kantaverkko on teknisenä

systeminä laaja ja kompleksi, mikä edellyttää laskennalta suurta määrää lähtötietoja. Samalla niihin liittyvien virhelähteiden määrä kasvaa. Tämän ja laskentametodeihin liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi tutkimuksen tulokset ovat käyttökelpoisimmillaan päästökategorioiden suuruusluokka arvioitaessa, eivät niiden absoluuttisessa ja eksaktissa määrittämisessä.

### 6.5.1 Yleistykset

Tutkimuksen lähtötiedoissa oli jonkin verran puutteita ja epätarkkuuksia, joiden kohdalla laskennassa jouduttiin tekemään perusteltuja yleistyksiä. Lähtötiedot käyttöön otetusta infrastruktuurista perustuivat Fingridin omaisuudenhallintajärjestelmän (Fingrid 2018d) tietoihin, joiden edustavuus riippuu manuaalisen datanhallinnan toteuttamisesta. Jos käyttöön otettujen komponenttien tiedoissa oli aukkoja, niitä arvioitiin yleistämällä tunnetun infrastruktuurin tietoja järjestelmästä puuttuville verkon osille.

Tutkimuksessa käytetyt sähköasemarakentamisen polttoaineenkulutus- ja materiaalitiedot jouduttiin yleistämään yksittäisiltä projekteilta koko tarkasteluvuonna rakennutetulle infrastruktuurille. Myös lähtötietoina käytetyt projektikohtaiset määrät olivat urakoitsijoilta saatuja arvioita eivätkä perustuneet esimerkiksi työmaan kirjanpitoon toteutuneesta kulutuksesta. Rakentamisen osuus kokonaispäästöistä oli kuitenkin hyvin pieni, jolloin myös lähtötietojen epätarkkuuden vaikutus tuloksiin pysyi vähäisenä.

Tilanteissa, joissa asianmukaista dataa ei ollut saatavilla Fingridiltä tai yhtiön palveluntarjoajilta, tehdyt oletukset perusteltiin muulla lähdemateriaalilla. Esimerkiksi Fingridin henkilöstön työmatkojen pituuksia ja kulkutapoja arvioitiin koko pääkaupunkiseudun henkilöliikennettä koskevien tilastotietojen perusteella. Pelkästään kirjallisuuteen pohjautavat oletukset ovat käyttökelpoisia tarkasteluvuoteen rajatun päästöarvion muodostamisessa, mutta päästöjen kehityksen seuraaminen hankaloituu.

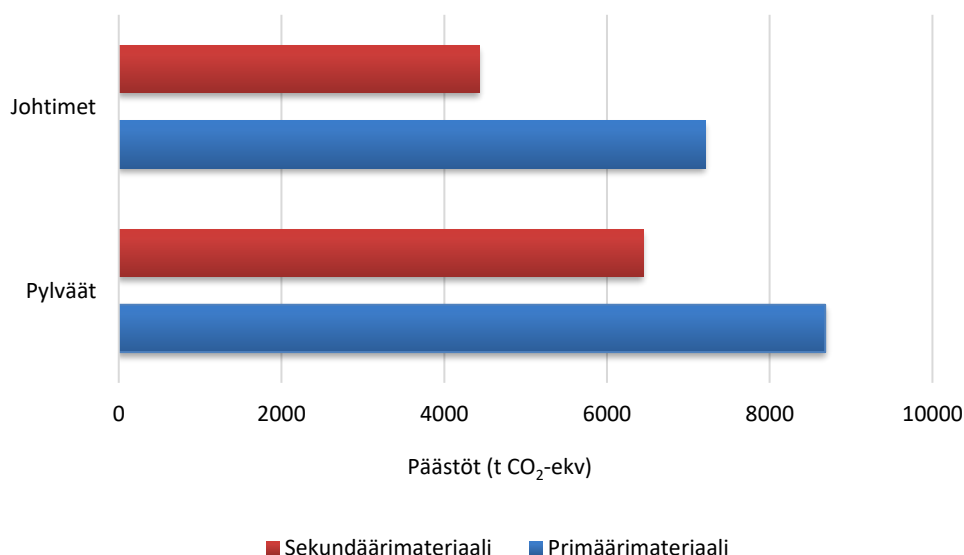
### 6.5.2 Materiaalivalinnat

Uusioraaka-aineen osuudella käytetyistä materiaaleista on huomattava vaikutus hiilijalanjälkilaskennan tuloksiin. Useissa tutkimuksissa (kts. Blackett et al. 2008; Kjeld et al. 2018) komponenttien ilmastovaikutukset ovat olleet hyvin herkkiä materiaalin valmistustavalle. Materiaalivalinnat ja niille käytetyt päästökertoimet olivat olennainen epävarmuustekijä myös tässä työssä.

Sähköasemalaitteiden mallinnuksessa hyödynnettiin ABB:n (2002; 2003a; 2003b; 2007a; 2007b) ympäristöselosteita, joissa laitteiden hiilijalanjälki oli laskettu yhtiön puolesta julkaisuvuonna. Tulokset tarkentuisivat, jos laskenta suoritettaisiin uudestaan selosteissa ilmoitetuille materiaalmassoille tuoreemmilla päästökertoimilla. Koska referenssilaitteiden rakenne ei välttämättä vastaa Fingridin todellisuudessa tarkasteluvuonna hankkimaa laitteistoa, myöskään edellä kuvattua uudelleenlaskentaa ei nähty tarkoituksenmukaisena

tulosten tarkentamisen kannalta. Tässä työssä laskettu laitteiston hiilijalanjälki on suuntaa antava arvio sähköasemalaitteiden painoarvosta yhtiön kokonaispäästöissä.

Kahden ilmastovaikutuksiltaan keskeisen kantaverkon rakennusmateriaalin, teräksen ja alumiinin uusioraaka-aineosuuden vaikutusta pylväiden ja johdinten hiilijalanjälkeen on esitetty kuvassa 18. Pylväiden kohdalla galvanoidun teräksen vaihtaminen täysin neitseellisestä materiaalista 50 % uusioraaka-ainetta sisältävään materiaaliin vähentäisi niiden valmistuksen kokonaispäästöjä noin 26 %:lla (World Steel Association 2018). Johtojen kohdalla vastaava vähennys siirryttäessä täysin malmipohjaisesta alumiinista 49-prosenttisen usioalumiinin käyttöön oli noin 38 % (Stolzt & Frischknecht 2016). Kaikkiin arvioituihin epäsuoriin päästöihin suhteutettuna kierrätysmetallien käyttö pienentäisi kokonaishiilijalanjälkeä noin 2 %. Pelkästään kolmannen laskentatason päästöihin verrattuna vastaava luku oli noin 11 %.



**Kuva 18.** Materiaalivalintojen vaikutus komponenttien hiilijalanjälkeen.

### 6.5.3 Laskentamenetelmät

Panos-tuotos- ja prosessidata sisältävät sekä erillään että yhdessä hybridimallina käytettynä monia epävarmuustekijöitä (kts. luku 3.2 *Laskentamenetelmät*). Prosessipohjaisen mallinnuksen merkittävin epävarmuustekijä oli katkaisuvirheen muodostuminen. Tutkimusrajauksen ulkopuolelle jätettiin kokonaan joitakin päästölähteitä lähtötietojen puutteen, niiden epätarkkuuden tai päästölähteelle arvioidun merkityksen vähäisyyden takia. Materiaaleista ja komponenteista keskeisin yksittäinen ryhmä olivat pienemmät sähköasemalaitteet, kuten mittamuuntajat ja ylijännitesuojat, joiden valmistuksen kasvihuonekaasupäästöjä ei arvioitu tämän työn puitteissa lainkaan. Myös kirjallisuudessa sähköasemalaitteiston arviointi on usein rajattu vain muutamaan laiteluokkaan (kts. esim. Harrison

et al. 2010; Hrólfssdóttir et al. 2014). Näiden laitteiden vaikutukset sähköasemien kokonaishiilijalanjälkeen on arvioitu pieneksi ja katkaisuvirhe siten kohtuulliseksi.

Panos-tuotosdatan käyttö laajoille, paljon rakenteiltaan eroavia komponentteja sisältäville kokonaisuuksille, kuten varavoimalaitoksille, ei ole ongelmattonta. Yksittäiset, ilmastomuutosvaikutukseltaan merkittävät hankinnat uppoavat laajoihin sektoreihin ja yleisesti sektorivalintojen vaikutus tuloksiin on suuri. Hyödynnetyn panos-tuotosmallin soveltuvuutta tarkasteluvuodelle on pyritty parantamaan käyttämällä kuluttajahintaindeksiä. Tästä huolimatta tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava pohjadataan ikä. Kuluttajahintojen muutoksen huomioinnilla voidaan vaikuttaa ainoastaan tarkastelun taloudellisen puolen edustavuuteen, mutta esimerkiksi mahdollisiin tekniikan tai regulaation kehittymisen myötä muuttuviin päästömääriin sillä ei ole vaikutusta. Myös sähkön- ja lämmönkulutuksen arviointi euro- tai neliöperusteisesti sisältää omat epävarmuustekijänsä.

Prosessi- ja panos-tuotososioiden välinen rajanveto tehtiin tässä työssä yhtiön toiminta-alueiden mukaisesti siten, että muuten arvioimatta jäänyt varavoimasektori käsiteltiin siihen tehtyjen investointien perusteella. Ratkaisua voidaan perustella sen katkaisuvirhettä pienentävällä vaikutuksella: vaikka päästölähteiden keskinäisen vertailun mahdollisuudet pienenevät lähtötietojen tyyppin muuttuessa, arvio kokonaispäästöistä tarkentuu. Varavoimalaitoskomponenttien kuljetuksia ei arvioitu erikseen, koska mahdollista kaksoislaskentaa haluttiin välttää.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä selvitettiin Suomen kantaverkkoyhtiön epäsuorien päästöjen lähteitä ja yhtiön toiminnasta aiheutuneiden epäsuorien ilmastovaikutusten määrää. Päästömäärien arvioinnissa hyödynnettiin sekä prosessi- että panos-tuotosperusteista elinkaarilaskentaa päästölähteestä riippuen. Tulokset osoittivat siirtohäviöitä kompensoivan energiantuotannon olevan merkittävin epäsuorien päästöjen lähde ja samalla suurin osatekijä koko yhtiön hiilijalanjäljessä.

Kokonaisuudessaan Fingridin epäsuorien päästöjen määräksi saatiin 268 604 t CO<sub>2</sub>-ekv, josta siirtohäviöt muodostivat noin 83 %. Seuraavaksi suurin päästölähde oli infrastruktuurin materiaalien ja komponenttien valmistus noin 15 %:lla kaikista epäsuorista päästöistä. Näistä päästöistä yli puolet allokoitiin voimajohtoihin. Pienemmistä päästökategorioista hiilijalanjälkiarvion kannalta oleellisia olivat komponenttien kuljetukset ja yhtiön omakäyttösähkö, vaikka kummankin vaikutus kaikkien epäsuorien päästöjen määrään oli alle 1 %. Siirrettyä energiayksikköä kohden epäsuorat päästöt olivat 3,92 g CO<sub>2</sub>-ekv/kWh. Tässä tutkimuksessa arvioitujen epäsuorien päästöjen määrä oli 19,6 % yhtiön vuoden 2017 vuosikertomuksessa esitettyä lukemaa korkeampi.

Saadut tulokset olivat pääosin linjassa kirjallisuuden kantaverkkoinfrastruktuurista tehtyjen elinkaaritarkastelujen kanssa niiltä osin, kun vertailua oli mahdollista suorittaa. Tutkimustulokset poikkesivat verrokkitutkimuksista siten, että tässä tutkimuksessa pylväiden valmistus oli johdinten valmistusta merkittävämpi päästölähde. Komponenttien valmistuksesta aiheutuneisiin päästöihin vaikuttivat ennen kaikkea valitut päästökertoimet, jotka olivat tässä työssä toimintojen globaaleja keskiarvoja eurooppalaisten vastineiden sijaan. Valintaa perusteltiin useiden alihankintaketjujen ulottumisella Euroopan rajojen ulkopuolelle. Siirrettyä energiayksikköä kohden lasketut päästöt olivat samaa suuruusluokkaa kahden vertaillun kantaverkkoyhtiön kanssa.

Fingridin merkittävimmät päästövähennysmahdollisuudet kohdistuvat verkon siirtohäviöiden pienentämiseen. Siirtohäviöiden määrään voidaan vaikuttaa verkon suunnittelulla ja komponenttien energiatehokkuuden lisäämisellä. Verkon kunnostaminen ja uusien linjojen rakentaminen puolestaan vaikuttavat yhtiön kolmannen laskentatason päästöjen määrään, minkä hiilijalanjälkeä kasvattavaa vaikutusta voidaan minimoida ottamalla ympäristönäkökohdat entistä perusteellisemmin huomioon alihankkijoiden kilpailutuksessa. Erityisen suuret vaikutukset hiilijalanjälkeen olivat pylväiden ja johdinten materiaalien valmistustavoilla. Hyödyntämällä uusioterästä ja -alumiinia neitseellisten materiaalien sijaan komponenttien hiilijalanjälki väheni 26–38 % alkuperäisestä.

Tässä tutkimuksessa hiilijalanjälkeä arvioitiin pääasiassa prosessiperusteisesti, mutta varavoimaloiden infrastruktuurille hyödynnettiin rahapanosten ja ilmastovaikutusten suhdetta mallintavaa panos-tuotosanalyysiä. Eri laskentametoodeilla saadut tulokset eivät ole

täysin vertailukelpoisia toisiinsa nähden, mutta menetelmiä yhdistelemällä arvio kokonaispäästöistä tarkentui. Prosessiperusteisen laskennan toteuttaminen edellyttää huolellista raportointia sekä kohdeyritykseltä että sen palveluntarjoajilta, ja epätarkkoja tai kokonaan puuttuvia lähtöarvoja korvattiin tarvittaessa kirjallisuudesta sovelletuilla arvioilla. Panos-tuotosdatan käyttö vaatii yritykseltä prosessidataa vähemmän resursseja lähtötietojen kokoamiseen, mutta tulosten tarkkuus voi kärsiä. Molemmat menetelmät sopivat kantaverkkoyhtiön hiilijalanjälkiarvion perustaksi, kunhan niiden käytön asettamat rajoitukset tiedostetaan tulosten tarkastelun yhteydessä.

Työssä onnistuttiin vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin, ja yhtiön merkittävimmät epäsuorien päästöjen lähteet pystyttiin identifioimaan. Vähemmän tärkeiksi arvioituja päästölähteitä jätettiin tutkimusrajauksen ulkopuolelle, jotta työ oli mahdollista toteuttaa saatavilla olleiden resurssien puitteissa. Jatkotutkimukseksi suositellaan paitsi tutkittavien päästölähteiden ja niiden määrittystarkkuuden lisäämistä myös päästömäärien kehityksen vuosittaista seuraamista, jolloin suoritettujen vähennystoimenpiteiden vaikutuksia voidaan arvioida. Hiilijalanjäljen mittaamisen jatkaminen yrityksessä on kuitenkin haasteellista ilman Fingridin ja palveluntarjoajien raportoinnin kehittämistä, johon tulisi kiinnittää huomiota tulevaisuudessa. Myös laskentametodien välistä rajausta voidaan muuttaa ja panos-tuotosanalyysiä soveltaa laajemmin, jolloin sekä laskentaan tarvittavien resurssien määrä että katkaisuvirheen vaikutus vähenee.

Kantaverkolla on merkittävä rooli energiamurroksessa, jossa fossiilisia polttoaineita korvataan ilmastovaikutuksiltaan edullisemmilla energiantuotantomuodoilla. Kantaverkon on pystyttävä ottamaan vastaan hajautuvan tuotantokapasiteetin tarpeet, mikä edellyttää lisäyksiä olemassa olevaan verkkoinfrastruktuuriin. Kantaverkon hiilijalanjälki ja erityisesti infrastruktuurin rakentamisen päästöt tulisikin suhteuttaa siihen ilmastohyötyyn, joka saavutetaan uusiutuvien energiantuotantomuotojen liittämällä sähköjärjestelmään.

## LÄHTEET

ABB. 2002. Environmental product declaration, Center Breaker Disconnecter type SGF range 123–245. Łódź, ABB Zwar S.A.

ABB. 2003a Environmental Product Declaration, Pantograph Disconnecter type TFB 123–550 kV. Łódź, ABB Zwar S.A.

ABB. 2003b Environmental Product Declaration, Power transformer TrafoStar 500 MVA. Ludvika, ABB Transformers AB.

ABB. 2007a. Environmental Product Declaration, GIS Type ELK-14 for 300 kV. Zurich, ABB Switzerland Ltd.

ABB. 2007b. Environmental Product Declaration, Live Tank Circuit Breaker, Type LTB 145D. Ludvika, ABB Power Technologies AB.

Aichele, R. & Felbermayr, G. 2012. Kyoto and the carbon footprint of nations. *Journal of Environmental Economics and Management*. Vol. 63(3), pp. 336–354.

Andrew, J. & Cortese, C. 2011. Accounting for climate change and the self-regulation of carbon disclosures. *Accounting Forum*. Vol. 35(3), pp. 130–138.

Antikainen, R. & Seppälä, J. (toim.). 2012. Elinkaarimenetelmät yrityksen päätöksenteon tukena – FINLCA-hankkeen loppuraportti. *Suomen ympäristö 10/2012*. Helsinki, SYKE. 90 s.

Arvesen, A., Nes, R.N., Huertas-Hernando, D. & Hertwich, E.G. 2014. Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across the North Sea. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 19(4), pp. 826–837.

Awanthi, M.G.G. & Navaratne, C.M. 2018. Carbon Footprint of an Organization: a Tool for Monitoring Impacts on Global Warming. *Procedia Engineering*. Vol. 212, pp. 729–735.

Beroual, A. & Haddad, A.M. 2017. Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Gas in High-Voltage Power Network Applications. *Energies*. Vol. 10(8), pp. 1216.

Blackett, G., Savory, E., Toy, N., Parke, G.A.R., Clark, M. & Rabjohns, B. 2008. An evaluation of the environmental burdens of present and alternative materials used for electricity transmission. *Building and Environment*. Vol. 43(7), pp. 1326–1338.



Blanco, C., Caro, F. & Corbett, C.J. 2016. The state of supply chain carbon footprinting: analysis of CDP disclosures by US firms. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 135, pp. 1189–1197.

Bumby, S., Druzhinina, E., Feraldi, R., Werthmann, D., Geyer, R. & Sahl, J. 2010. Life cycle assessment of overhead and underground primary power distribution. *Environmental science & technology*. Vol. 44(14), pp. 5587–5593.

Butera, S., Christensen, T. H. & Astrup, T. F. 2015. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. *Waste Management*. Vol. 44, pp. 196–205.

Carbon Trust. 2007. Carbon footprinting. An introduction for organizations. Saatavissa (viitattu 5.5.2018): <http://www.carbontrust.co.uk/publications/publicationdetail.htm?productid=CTV033>

Carnegie Mellon University Green Design Institute. 2018. Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) US 2002 (428 sectors). Purchaser model. Saatavissa (viitattu 5.10.2018): <http://www.eiolca.net/>

CEER (Council of European Energy Regulators). 2017. CEER Report on Power Losses. C17-EQS-80-03. Brussels, CEER. 43 p.

Crawford, R.H., Bontinck, P.A., Stephan, A., Wiedmann, T. & Yu, M. 2018. Hybrid life cycle inventory methods – A review. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 172, pp. 1273–1288.

Dahlbo, H., Myllymaa, T., Manninen, K. & Korhonen, M.-R. 2011. Julia 2030 -hanke - HSY:n alueella tuotettujen, käsiteltyjen ja hyödynnettyjen jätelajien khk-päästökertoimet – Laskelmien taustatietoa. Liite 1. Suomen ympäristökeskus (SYKE). Saatavissa (viitattu 7.7.2018): <https://www.hsy.fi/julia2030/Documents/julia2030/Documents/Jätteid%20khk-kertoimien%20taustadokumentti%202011.pdf>

DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs). 2017. Greenhouse gas reporting: conversion factors 2017. Saatavissa (viitattu 4.9.2018): <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2017>

Denny, E., Tuohy, A., Meibom, P., Keane, A., Flynn, D., Mullane, A. & O'malley, M. 2010. The impact of increased interconnection on electricity systems with large penetrations of wind generation: A case study of Ireland and Great Britain. *Energy Policy*. Vol. 38(11), pp. 6946–6954.

Ecoinvent. 2016. Life cycle inventory database v3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

EN 50182. Conductors for overhead lines. Round wire concentric lay stranded conductors. Brussels, CENELEC. 78 p.

Elia. 2018. Annual report 2017. Elia Group. Saatavissa (viitattu 8.6.2018): [www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/annual-report/1806\\_ELIA\\_RA2017\\_PDF%20COMPLET\\_WEB\\_UK.pdf](http://www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/annual-report/1806_ELIA_RA2017_PDF%20COMPLET_WEB_UK.pdf)

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1. Helsinki, Otatieto. 520 s.

EUROFER. 2017. European steel in figures 2018. Brussels, EUROFER. 66 p.

Fingrid. 2015. Vuosikertomus 2014. Saatavissa (viitattu 10.10.2018): <http://annualreport2013-2015.fingrid.fi/fi/2014/Pages/default.aspx>

Fingrid. 2016. Vuosikertomus 2015. Saatavissa (viitattu 10.10.2018): <http://annualreport2013-2015.fingrid.fi/fi/2015/Pages/default.aspx>

Fingrid. 2017. Vuosikertomus 2016. Saatavissa (viitattu 10.10.2018): <http://annualreport2016.fingrid.fi/>

Fingrid. 2018a. Häviösähkö. Saatavissa (viitattu 7.9.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/sahkon-siirtovarmuus/haviosahko/>

Fingrid. 2018b. Maankäyttö- ja ympäristöpolitiikka. Saatavissa (viitattu 16.11.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/maankaytto-ja-ymparistopolitiikka/>

Fingrid. 2018c. Maisemapylväs. Saatavissa (viitattu 2.10.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/voimajohdot/maisemapylvas/>

Fingrid. 2018d. Maximo-omaisuudenhallintajärjestelmä.

Fingrid. 2018e. Peltopylväs. Saatavissa (viitattu 15.8.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kunnossapito/voimajohdot/peltopylvas/>

Fingrid. 2018f. Perusesittely. Rajoitettu saatavuus.

Fingrid. 2018g. Pohjoismainen sähköjärjestelmä ja liitynnät muihin järjestelmiin. Saatavissa (viitattu 20.8.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/>

Fingrid. 2018h. Suomen sähköjärjestelmä. Saatavissa (viitattu 9.5.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid. 2018i. Varavoimalaitokset. Saatavissa (viitattu 23.10.2018): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimalaitokset/>

Fingrid. 2018j. Vuosikertomus 2017. Saatavissa (viitattu 15.5.2018): <https://annualreport.fingrid.fi/>

Fingrid. 2018k. Ympäristövaikutukset. Saatavissa (viitattu 15.9.2018): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/ymparistovaikutukset/>

Gargiulo, A., Girardi, P. & Temporelli, A. 2017. LCA of electricity networks: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 22(10), pp. 1502–1513.

GHG Protocol. 2004. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition. World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 112 p.

GHG Protocol. 2011. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 148 p.

GHG Protocol. 2013. Required Greenhouse Gases in Inventories. Accounting and Reporting Standard Amendment. February, 2013. Saatavissa (viitattu 12.6.2018): [www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/NF3-Amendment\\_052213.pdf](http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/NF3-Amendment_052213.pdf)

Hammond, G.P. & Jones, C.I. 2008. Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*. Vol. 161(2), pp. 87–98.

Harrison, G.P., Karamanlis, S. & Ochoa, L.F. 2010. Life cycle assessment of the transmission network in Great Britain. *Energy Policy*. Vol. 38(7), pp. 3622–3631.

Hegedić, M., Tihomir, O., Đukić, G. & Drašković, H. 2016. Life cycle assessment of power transformer-case study. Conference paper. *Management of Technology – Step to Sustainable*. 01.-03.06.2016, Poreč, Croatia.

Heinonen, J. & Junnila, S. 2011. Hiilikulutus ja hiilijohtamisen mahdollisuudet Tampereen alueella. *TIEDE + TEKNOLOGIA* 21/2011. Helsinki, Aalto-yliopisto. 40 s.

Hendrickson, C.T., Lave, L.B. & Matthews, H.S. 2006. Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach. Washington, DC, Resources for the Future. 262 p.

Heiskanen, T. Kunnonhallintapäällikkö, Fingrid Oyj, Helsinki. Sähköposti 18.10.2018.

Hertwich, E.G., Gibon, T., Bouman, E.A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G.A. & Shi, L. 2015. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 112(20), pp. 6277–6282.

Hickmann, T. 2017. Voluntary global business initiatives and the international climate negotiations: A case study of the Greenhouse Gas Protocol. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 169, pp. 94–104.

Hrólfssdóttir, H.B., Ingólfssdóttir, G.M., Pálsson, M., Valsdóttir, I.L., Guðmundsson, I., Bjarnason, Þ., Guðjónsdóttir, G.M. & Bjarnadóttir, H.J. 2014. Life cycle assessment of the high voltage OHL transmission system in Iceland. C3-211 CIGRÉ. Paris, Cigré.

Huang, Y.A., Weber, C.L. & Matthews, H.S. 2009. Carbon footprinting upstream supply chain for electronics manufacturing and computer services. 2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology. 18–20.05.2009, Phoenix, AZ, US, pp. 1–6.

Höök, M. & Tang, X. 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change - A review. *Energy Policy*. Vol. 52, pp. 797–809.

IEA (International Energy Agency). 2017. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion: Overview. OECD/IEA. 14 p.

IEA & UIC (International Energy Agency & International Union of Railways). 2015. *Railway Handbook 2015 - Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions*. Paris, International Energy Agency & International Union of Railways.

IMO (International Maritime Organization). 2009. *Second IMO GHG Study 2009*. London, IMO. 220 p.

IMO (International Maritime Organization). 2015. *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. London, IMO. 285 p.

Inakollu, S., Morin, R. & Keefe, R. 2017. Carbon Footprint Estimation in Fiber Optics Industry: A Case Study of OFS Fitel, LLC. *Sustainability*. Vol. 9(5), p. 865.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, Cambridge University Press. 996 p.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge, Cambridge University Press. 1535 p.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. & Minx, J.C. (eds.)]. Cambridge, Cambridge University Press. 151 p.

IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Global Warming of 1.5 °C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Summary for Policy Makers. Incheon, IPCC. 33 p.

ISO 14040. 2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. The International Organization for Standardization. 20 p.

ISO. 2007. ISO, WRI, and WBCSD announce cooperation on greenhouse gas accounting and verification. 3.12.2017. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <https://www.iso.org/news/2007/12/Ref1093.html>

ISO 14064-1. 2012. Greenhouse gases. Part 1: Specification with guidance at the organizational level for quantification and reporting of greenhouse gases and removals. The International Organization for Standardization. 20 p.

ISO. 2018. About ISO. The International Organization for Standardization. Saatavissa (viitattu 25.5.2018): <https://www.iso.org/about-us.html>

Jalonen, M. 2011. Avojohtot. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). Kantaverkon käsikirja. Helsinki, Fingrid, s. 347–369.

Jalonen, M. Kunnossapitopäällikkö, Fingrid Oyj, Helsinki. Sähköposti 17.10.2018.

Jorge, R.S., Hawkins, T.R. & Hertwich, E.G. 2012a. Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 1: power lines and cables. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 17(1), pp. 9–15.

Jorge, R.S., Hawkins, T.R. & Hertwich, E.G. 2012b. Life cycle assessment of electricity transmission and distribution—part 2: transformers and substation equipment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 17(2), pp. 184–191.

Jorge, R.S. & Hertwich, E.G. 2013. Environmental evaluation of power transmission in Norway. *Applied energy*. Vol. 101, pp. 513–520.

Jorge, R.S. & Hertwich, E.G. 2014. Grid infrastructure for renewable power in Europe: The environmental cost. *Energy*. Vol. 69, pp. 760–768.

Junnila, S.I. 2006. Empirical comparison of process and economic input-output life cycle assessment in service industries. *Environmental science & technology*. Vol. 40(22), pp. 7070–7076.

Karabay, S., Ertürk, A.T., Zeren, M., Yamanoglu, R. & Karakulak, E. 2018. Failure analysis of wire-breaks in aluminum conductor production and investigation of early failure reasons for transmission lines. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 83, pp. 47–56.

Karjalainen, M. Toimitusjohtaja, Moto Pro Oy, Klaukkala. Sähköposti 16.8.2018.

Kefford, B.M., Ballinger, B., Schmeda-Lopez, D.R., Greig, C. & Smart, S. 2018. The early retirement challenge for fossil fuel power plants in deep decarbonisation scenarios. *Energy Policy*. Vol. 119, pp. 294–306.

Kieffel, Y., Spinosa, A., Laruelle, E., Stumpf, K. 2014. Life cycle assessment and end-of-life management of GIS and AIS. CIGRÉ C3-203. Paris, Cigré.

Kilpeläinen, A., Alam, A., Strandman, H. & Kellomäki, S. 2011. Life cycle assessment tool for estimating net CO<sub>2</sub> exchange of forest production. *GCB Bioenergy*. Vol. 3(6), pp. 461–471.

Kivimaa, P. 2018. Uusi energia- ja ilmastostrategia, energiamurros ja ‘luova tuho’. *Smart Energy Transition*. Saatavissa (viitattu 16.8.2018): <http://smartenergytransition.fi/fi/uusi-energia-ja-ilmastostrategia-energiaturros-ja-luova-tuho/>

Kjeld, A., Ingólfssdóttir, G.M., Bjarnadóttir, H.J. & Jónsson, R. 2018. Life Cycle Assessment for Transmission Towers. A comparative study of three tower types. Report 20.02.2018. Reykjavík, EFLA.

Korhonen, M.R., Pitkänen, K. & Niemistö, J. 2018. Selvitys orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon vaikutuksista. *Suomen ympäristö 3/2018*. Helsinki, Ympäristöministeriö. 108 s.

Kuitunen, S. & Penttilä, M. 2011. Voimajärjestelmän ympäristövaikutukset. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). *Kantaverkon käsikirja*. Helsinki, Fingrid, s. 283–293.

Kuosa, D. 2011. Mittamuuntajat. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). *Kantaverkon käsikirja*. Helsinki, Fingrid, s. 440.

L. 29.12.2016/1398. Laki vesi- ja energiahuollon, liikenteen ja postipalvelujen alalla toimivien yksiköiden hankinnoista ja käyttöoikeussopimuksista.

L. 5.5.2017/252. Laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä.

L. 9.8.2013/588. Sähkömarkkinalaki.

L&T (Lassila & Tikanoja). 2018. Jätekirjanpito 2017. Lassila & Tikanoja Oyj.

Laitinen, A. Palvelupäällikkö, Eltel Networks Oy, Varkaus. Sähköposti 20.7.2018.

Laitinen, T. 2011. Kytkinlaitteet. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). Kantaverkon käsikirja. Helsinki, Fingrid, s. 457–475.

Liikennevirasto. 2018. Henkilöliikennetutkimus 2016. Itsepalveluanalyysit. Saatavissa (viitattu 21.9.2018): <https://www.liikennevirasto.fi/tilastot/henkilöliikennetutkimus/itsepalveluanalyysit#.V7>

Liu, B., Wei, Q., Zhang, B. & Bi, J. 2013. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of the Total Environment*. Vol. 447, pp. 361–369.

LKAB Minerals. 2015. Raskasta asiaa betonista – Raskasbetoni. *Betoni*. Vol. 2015(2), pp. 74–77.

Ludányi, G. Mechanical Engineer, FCI Composite Insulator Ltd., Tápiószecső. E-mail 11.7.2018.

Mazzanti, G., Stomeo, G. & Mancini, S. 2016. State of the art in insulation of gas insulated substations: main issues, achievements, and trends. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Vol. 32(5), pp. 18–31.

Metsäntutkimuslaitos. 2014. Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Vantaa, Metsäntutkimuslaitos. 428 s.

Motiva. 2017. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Motiva Oy. Saatavissa (viitattu 3.3.2018): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-laskentaohje\\_energian\\_kulutuksen\\_hiilidioksidipaastojen\\_laskentaan/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian_kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet)

Naumanen, J. 2011. Kytkinlaitokset. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). Kantaverkon käsikirja. Helsinki, Fingrid, s. 404–411.

Nylund, N.-O., Söderena, P. & Rahkola, P. 2016. Työkoneiden CO<sub>2</sub> päästöt ja niihin vaikuttaminen. Tutkimusraportti VTT-R-04745-16. Espoo, VTT. 18 s. Saatavissa (viitattu 3.10.2018): <http://www.ym.fi/download/noname/%7BEC3AFE90-B3FC-446B-90C3-4A8B253B4256%7D/125900>

- Onat, N.C., Kucukvar, M. & Tatari, O. 2014. Scope-based carbon footprint analysis of US residential and commercial buildings: An input-output hybrid life cycle assessment approach. *Building and Environment*. Vol. 72, pp. 53–62.
- Pardo, N., Moya, J. & Vatopoulos, K. 2012. Prospective Scenarios on Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions in the EU Iron & Steel Industry. JRC Scientific and Policy Reports. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 48 p.
- Peters, G.P. 2010. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Vol. 2(4), pp. 245–250.
- Peters, G.P. & Solli, C. 2010. Global Carbon Footprints: Methods and Import/Export Corrected Results from the Nordic Countries in Global Carbon Footprint Studies. Copenhagen, Nordic Council of Minister. 130 p.
- Pinkse, J. & Kolk, A. 2009. *International business and global climate change*. Oxon, Routledge. 200 p.
- Prysmian. 2013. ACSR ja AACSR. Tuotekuvauslomake. 29.10.2013. Prysmian Group. Saatavissa (viitattu 9.7.2018): [https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business\\_markets/markets/downloads/datasheets/ACSRjaAACSR.pdf](https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/ACSRjaAACSR.pdf)
- Prysmian. 2018. Ohjauskaapelit. Prysmian Group. Saatavissa (viitattu 20.8.2018): <https://fi.prysmiangroup.com/tukut-urakoitsijat/ohjauskaapelit>
- REE (Red Eléctrica de España). 2018. Sustainability Report 2017. Saatavissa (viitattu 11.6.2018): [https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree\\_sustainability\\_report\\_2017.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree_sustainability_report_2017.pdf)
- Reka Kaapeli. 2018. Ohjauskaapelit. Reka Kaapeli Oy. Saatavissa (viitattu 20.8.2018): <https://www.reka.fi/ohjaus-ja-instrumentointikaapelit/ohjauskaapelit>
- REN (Redes Energéticas Nacionais). 2018. Report and Accounts 2017. Saatavissa (viitattu 4.8.2018): [relatorioecontas2017.ren.pt/en/](http://relatorioecontas2017.ren.pt/en/)
- Reynolds, N. & Pharaoh, M. 2010. An introduction to composites recycling. In Goodship, V. (ed.). *Management, Recycling and Reuse of Waste Composites*. Cambridge, Woodhead Publishing, pp. 3–19.
- RIL. 2012. Matalaenergiarakentaminen. Toimitilat. RIL 259-2012. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 285 s.
- Roos, C.J. 2008. Biomass drying and dewatering for clean heat & power. Olympia (WA), Northwest CHP Application Center. 25 p. + app.
- Roponen, J. 2018. Projektipäällikkö, TMV Service Oy, Kuopio, sähköposti 31.8.2018.



Saarinen, V. M., Aarnio, J., Uotila, E. & Viitala, E. J. 2002. Metsätiehankkeen yksityistaloudellinen kannattavuus kestävän metsätalouden rahoitustuella. *Metsätieteen aikakauskirja*. Vol. 4, pp 593–604.

Seppälä, J., Mäenpää, I., Koskela, S., Mattila, T., Nissinen, A., Katajajuuri, J.-M., Härmä, T., Korhonen, M.-R., Saarinen, M. & Virtanen, Y. 2009. Suomen kansantalouden materiaaliavirtojen ympäristövaikutusten arviointi ENVIMAT-mallilla. Suomen ympäristö 20/2009. Helsinki, Suomen Ympäristökeskus. 134 s.

Seppälä, J., Nissinen, A., Kupiainen, K., Karvosenoja, N., Tainio, P., Mattinen, M., Soimakallio, S., Koljonen, T., Lehtilä, A., Ekholm, T., Saarinen, M. & Silvennoinen, K. 2017. Kulutusnäkökulma ilmastopolitiikassa - toimien vaikutusarvioita. 15.5.2017. Helsinki, SYKE. 27 p.

Seppänen, T. 2011. Voimajohtojen vaikutukset ympäröivään luontoon. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). *Kantaverkon käsikirja*. Helsinki, Fingrid, s. 293–296.

SMT (Suomen Matkatoimisto Oy). 2018. Flight emission report 2017. Rajoitettu saatavuus.

Statnett. 2018. Annual report 2017. Saatavissa (viitattu 31.8.2018): [www.statnett.no/Global/Dokumenter/Om%20Statnett/Finans/Årsrapport/Statnett%20Annual%20Report%202017.pdf](http://www.statnett.no/Global/Dokumenter/Om%20Statnett/Finans/Årsrapport/Statnett%20Annual%20Report%202017.pdf)

Stolzt, P. & Frischknecht, R. 2016. Life Cycle Inventories of Aluminium and Aluminium Profiles. Uster, Schweizerische Zentrale Fenster und Fassaden (SZFF). 23 p.

Strømman, A.H., Peters, G.P. & Hertwich, E.G. 2009. Approaches to correct for double counting in tiered hybrid life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 17(2), pp. 248–254.

Sundin, H. & Ranganathan, J. 2002. Managing business greenhouse gas emissions: the greenhouse gas protocol – a strategic and operational tool. *Corporate environmental strategy*. Vol. 9(2), pp. 137–144.

SYKE (Suomen ympäristökeskus). 2013. Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotomalli. Saatavissa (viitattu 18.5.2018): [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Tuotesuunnittelu\\_ja\\_tuotteet/Elinkaariarviointi\\_jalanjaljet\\_ja\\_panostuotomalli](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Tuotesuunnittelu_ja_tuotteet/Elinkaariarviointi_jalanjaljet_ja_panostuotomalli)

Säynäjoki, A., Heinonen, J. & Junnila, S.I. 2011. Asuinalueen rakentamisessa syntyvien hiilipäästöjen hybridi-LCA-mallinnus. *TIEDE + TEKNOLOGIA* 1/2011. Helsinki, Aalto-yliopisto. 51 s.

Tammi, J. 2018. Suunnittelija, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 30.5.2018.

TenneT. 2018. Integrated Annual report 2017. TenneT Holding B.V. Saatavissa (viitattu 8.6.2018): <https://annualreport.tennet.eu/2017/annualreport/download/all-downloads>

Terna. 2018. Sustainability Report and Consolidated Non Financial Statement. TERNA S.p.A. Saatavissa (viitattu 3.8.2018): <http://download.terna.it/terna/0000/1042/44.PDF>

Tilastokeskus. 2018. Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, snt/kWh. Tilastokeskuksen PX-Web-tietokannat. Saatavissa (viitattu 31.7.2018): [http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_ene\\_\\_ehi/stat-fin\\_\\_ehi\\_pxt\\_004\\_fi.px/?rxid=0af87453-f317-4f94-a2df-e3628a7d647b](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/stat-fin__ehi_pxt_004_fi.px/?rxid=0af87453-f317-4f94-a2df-e3628a7d647b)

Tilastokeskus. 2017. Polttoaineluokitus 2017. Saatavissa (viitattu 31.7.2018): [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html)

Tuhkanen, S. 2002. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. VTT Tiedotteita 2142. Espoo, VTT Prosessit. 46 s.

Turconi, R., Simonsen, C.G., Byriel, I.P. & Astrup, T. 2014. Life cycle assessment of the Danish electricity distribution network. International Journal of Life Cycle Assessment. Vol. 19(100), pp. 100–108.

UN (United Nations). 2012. Doha Amendment to the Kyoto Protocol. Adoption of amendment to the Kyoto Protocol Reference: C.N.718.2012.TREATIES-XXV II.7.c. Depository notification.

UNEP (United Nations Environment Programme). 2011. Recycling Rates of Metals. A Report of a Working Group on the Global Metal Rows to the International Resource Panel. UNEP. 44 p.

U.S. Bureau of Labor Statistic. 2018. Consumer Price Index. Saatavissa (viitattu 2.8.2018): <https://www.bls.gov/cpi/>

Verohallinto. 2017. Valuuttakurssit. Saatavissa (viitattu 6.9.2017): <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/49083/valuuttakurssi/>

Vinter, R. 2018. Paikkatietoasiantuntija, Blom Kartta Oy, Helsinki. Sähköposti 3.7.2018.

VTT. 2017. LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Saatavissa (viitattu 2.7.2018): [lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/)

Vuorikoski, S. Kehityspäällikkö, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 4.8.2018.

Vuorikoski, S. 2011. Kemikaalit. Teoksessa: Laasonen, M., Saarinen, K., Sederlund, J., Sulamaa, P., Uusitalo, J., Uusitalo, M. & Yli-Salomäki, P. (toim.). Kantaverkon käsikirja. Helsinki, Fingrid, s. 314–315.

VR. 2017. VR Group responsibility report 2016. VR Group. Saatavissa (viitattu 1.9.2018): [www.vrgroup.fi/en/annual-report-2016/](http://www.vrgroup.fi/en/annual-report-2016/)

Välimaa, K. Rakentamispäällikkö, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 11.9.2018.

Wackernagel, M. & Rees, W. E. 1996. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth. Gabriola Island, New Society Publishers. 176 p.

Wang, W., Beroual, A., Mehiri, T. & Tremouille, G. 2012. Life cycle assessment on a 765 kV AC transmission system. Conference paper. 44th International Conference on Large High Voltage Electric Systems 2012. 26.-31.8.2012, Paris, France. 7 p.

Weidema, B.P., Thrane, M., Christensen, P., Schmidt, J. & Løkke, S. 2008. Carbon footprint: a catalyst for life cycle assessment?. *Journal of industrial Ecology*, Vol. 12(1), pp. 3–6.

Williams, E.D., Weber, C.L. & Hawkins, T.R. 2009. Hybrid framework for managing uncertainty in life cycle inventories. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 13(6), pp. 928–944.

Yli-Kovero, L. Projektipäällikkö, Lassila & Tikanoja Oyj, Vantaa. Sähköposti 14.9.2018.

Zhang, S., Pang, B. & Zhang, Z. 2015. Carbon footprint analysis of two different types of hydropower schemes: comparing earth-rockfill dams and concrete gravity dams using hybrid life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 103, pp. 854–862.

Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W. & Li, X. 2016. Environmental footprint of aluminum production in China. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 133, pp. 1242–1251.

## LIITE A: PÄÄSTÖKERTOIMET

**Taulukko 24.** Tutkimuksessa käytetyt päästökertoimet.

<b>Materiaalit</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Alumiini	9,31 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Stolzt & Frischknecht 2016
Alumiiniseos	6,86 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Galvanoitu teräs	2,7 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	World Steel Association 2017
Epoksimuovi	4,34 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Kupari	4,28 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Lasi	1,08 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Lasikuitu	2,66 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
PVC	2,03 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Raudoitettu betoni	0,24 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Hammond & Jones 2008
Silikoni	3,4 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Valokuitu	4,81 kg CO <sub>2</sub> -ekv/km	Inakollu et al. 2017
<b>Prosessointi</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Kylmäveto	0,343 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Ruiskuvalu	1,43 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
<b>Polttoaineiden käyttö</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Diesel	2,37 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	Tilastokeskus 2017
Kevyt polttoöljy	2,65 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	Tilastokeskus 2017
Lentobensiini	2,21 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	Tilastokeskus 2017
Lentopetroli	2,50 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	Tilastokeskus 2017
<b>Polttoaineiden valmistus</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Diesel	0,62 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	DEFRA 2017
Kevyt polttoöljy	0,54 kg CO <sub>2</sub> -ekv/kg	Ecoinvent 2016
Lentopetroli	0,53 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	DEFRA 2017
Propaani	0,19 kg CO <sub>2</sub> -ekv/l	DEFRA 2017
<b>Liike- ja työmatkustaminen</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Henkilöauto	89 g CO <sub>2</sub> -ekv/hkm	VTT 2017
Henkilöauto	152 g CO <sub>2</sub> -ekv/km	VTT 2017
Juna	1,4 g CO <sub>2</sub> -ekv/hkm	VR 2017
Linja-auto	53 g CO <sub>2</sub> -ekv/hkm	VTT 2017
<b>Kuljetukset</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Puoliperävaunun yhdistelmä	38 g CO <sub>2</sub> -ekv/tkm	VTT 2017
Konttialus (0–999 TEU)	36,3 g CO <sub>2</sub> -ekv/tkm	IMO 2009
Konttialus (1000–1999 TEU)	32,1 g CO <sub>2</sub> -ekv/tkm	IMO 2009
Tavarajuna	14 g CO <sub>2</sub> -ekv/tkm	IEA & UIC 2015
<b>Jätehuolto</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Kaatopaikkasijoitus, liete	1992,09 kg CO <sub>2</sub> -ekv/t	Liu et al. 2013
Kaatopaikkasijoitus, rakennusjäte	17,9 kg CO <sub>2</sub> -ekv/t	Butera et al. 2015
Kaatopaikkasijoitus, sekajäte	423 kg CO <sub>2</sub> -ekv/t	Dahlbo et al. 2011
Korkealämpötilapoltto	1410 kg CO <sub>2</sub> -ekv/t	Dahlbo et al. 2011
<b>Energiankulutus</b>	<b>Päästökerroin</b>	<b>Lähde</b>
Sähkönkulutus	181 g CO <sub>2</sub> -ekv/kWh	Tilastokeskus 2017, Motivan 2016 mukaan
Lämmönkulutus	176 CO <sub>2</sub> -ekv/kWh	Tilastokeskus 2017, Energiateollisuus ry:n 2016 mukaan

## LIITE B: CPI-KULUTTAJAHINTAINDEKSI

Kuluttajahintaindeksi CPI (engl. consumer price index) kuvaa kuluttajahintojen kehitystä Yhdysvalloissa. Indeksillä investointien nykyarvoa voidaan verrata niiden arvoon aikaisempina vuosina. Taulukossa 25 on esitetty kuluttajahintojen muutosprosentti sekä muuntokerroin vuosina 2002–2017. Fingridin vuoden 2017 käyttöönottoja vastaavat investoinnit on muunnettu yhteneviksi US 2002 Purchaser -panos-tuotosmallin kanssa soveltamalla yhtälöä 3.

$$\frac{a}{CPI} = b, \quad (3)$$

jossa  $a$  on investointivuoden rahapanos (€),  $CPI$  kuluttajahintaindeksien suhde ja  $b$  rahapanoksen arvo tarkasteluvuonna (€). Tässä työssä rahapanokset muutettiin vuoden 2017 arvoista vuoden 2002 vastaaviin arvoihin käyttäen kerrointa 1,3625.

**Taulukko 25.** *CPI 2002–2012 (U.S. Bureau of Labor Statistic 2017).*

Vuosi	CPI	Vuosittainen muutos (%)	Muuntokerroin suhteessa vuoden 2002 hintoihin
2002	179,9	1,6	1
2003	184,0	2,3	1,0228
2004	188,9	2,7	1,0500
2005	195,2	3,4	1,0850
2006	201,6	3,2	1,1206
2007	207,3	2,8	1,1523
2008	215,303	3,8	1,1968
2009	214,537	-0,4	1,1925
2010	218,056	1,6	1,2121
2011	224,939	3,2	1,2504
2012	229,594	2,1	1,2762
2013	232,957	1,5	1,2949
2014	236,736	1,6	1,3159
2015	237,017	0,1	1,3175
2016	240,007	1,3	1,3341
2017	245,12	2,1	1,3625

## LIITE C: KULJETUKSET

**Taulukko 26.** *Komponenttien kuljetukset kuljetustavoittain.*

Komponentti	Tehtaan sijainti	Lastin paino (t)	Merikuljetuksen pituus (1 000–1 999 TEU) (km)	Merikuljetuksen pituus (0–999 TEU) (km)	Maantienkuljetuksen pituus (km)	Rautatiekuljetuksen pituus (km)
Johtimet	Bozyock, Turkki	911	5560	2246	560	
	Shanghai, Kiina	10	18411	2246	150	
Pylväät	Hanjoang, Kiina	134	18411	2246	235	
	Adana, Turkki	267	5560	2246	220	
	Torun, Puola	267		900	330	
	Zagreb, Kroatia	2672	5499	2137	310	
Eristimet	Lviv, Ukraina	95			1900	
	Tápiószecső, Unkari	82			2400	
Muuntajat	Busan, Etelä-Korea	873	19985	2145		55
GIS-asemat	Berliini, Saksa	15			2110	
	Zürich, Sveitsi	15			2880	
Katkaisijat	Berliini, Saksa	56			2248	
Erottimet	Bunschoten-Spa- kenburg, Itävalta	122			2835	
Yhteensä		5519	73424	14168	16178	55

## LIITE D: PÄÄSTÖLASKENNAN TULOKSET

**Taulukko 27.** *Hiilijalanjälkilaskennan tulokset.*

Päästölähde	Päästöt (t CO <sub>2</sub> -ekv)
<b>Toinen laskentataso</b>	<b>224 207</b>
Omakäyttöenergia	2 844
Omakäyttösähkö	2 669
Omakäyttölämpö	175
Häviöt	221 363
<b>Kolmas laskentataso</b>	<b>44 397</b>
Komponenttien materiaalit ja valmistus	38 862
Voimajohdot	19 886
Sähköasemat	12 606
Varavoimalaitokset	6 370
Rakentaminen ja muut palvelut	1 663
Polttoaineet	982
Komponenttien kuljetukset	1 812
Jätehuolto	385
Liikematkustaminen	640
Työmatkat	53
<b>Yhteensä</b>	<b>268 604</b>

**Kuva 19.** *Hiilijalanjälkilaskennan tulokset pylväsdiagrammina.*

